



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA
CIRA/UNAN-MANAGUA



*Trabajo de Tesis Para optar
al grado de Máster en
Ciencias del Agua*

Título del trabajo

**Evaluación de la migración de contaminantes desde el Lago Xolotlán hacia el
Lago Cocibolca.**

Autora:

Ing. María José Zamorio Aburto

Tutora: MSc. Yelba Flores Meza

Asesores: MSc. Jorge Guatemala
MSc. Elizabet Peña

Managua 17 de diciembre, 2018.

Financiado por: Proyecto Manejo de Agua en Nicaragua y Centroamérica; y el Centro Para la Investigación En Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua.

DEDICATORIA

A ti Señor, creador del Universo, por tu amor y misericordia estoy aquí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos por brindarme la extraordinaria oportunidad de formarme y generar conocimiento para la gestión sostenible de nuestros recursos hídricos, sobre todo en los lagos Xolotlán y Cocibolca.

A mi tutora, profesora Yelba Flores por sus aportes, acompañamiento y tiempo agradable que compartimos.

Al Dr. Willian Martínez Bermúdez por sus valiosos aportes a la investigación, compartir sus conocimientos y guiarme en este trabajo.

A la Dra. Kathy Ryan y al Dr. David Bethune por impulsar esta investigación y lograr que se concretizará.

Al profesor Salvador Montenegro y a la Dra. Katherine Vammen por apoyarme mi estancia en el programa de la Maestría.

A mis asesores y profesores del programa de Maestría, fue un gran placer compartir con ustedes y estaré eternamente agradecida por los nuevos conocimientos adquiridos. La lista es larga pero vale la pena compartirla: Valeria Delgado, Ninoska Chow, Luis Moreno, Francisco Picado, Katia Montenegro, Heyddi Calderón, Jorge Guatemala, Elizabet Peña, Lorena Pacheco, Selvia Flores, Emilio Peña.

Al equipo de Coordinación de la Maestría por estar pendiente de cada uno de los detalles, gracias Valeria Delgado y Maryurie Martínez.

Al Centro de Investigaciones Geocientíficas (IGG CIGEO) por su apoyo para realizar la perforación de los piezómetros en el Lago Xolotlán.

A mis compañeros de clases Marcia Estrada, Maynor Ruiz, Dimas García, Alan Gatica, Yamilet Levy, Manuel Arriola.

A todas aquellas personas que me acompañaron en la recolección de los datos de la investigación, en especial a Don Álvaro, no está con nosotros pero siempre lo recordaré y agradeceré. Aprendí mucho de su disposición para el trabajo y su humildad.

Índice General

I. INTRODUCCIÓN.....	16
II. ÁREA DE ESTUDIO	17
III. ANTECEDENTES	19
IV. JUSTIFICACIÓN	21
V. OBJETIVOS	22
V.1. Objetivo General.....	22
V.2. Objetivos específicos.....	22
VI. MARCO TEÓRICO.....	23
VI.1. Caracterización Físico Natural	23
VI.1.1. Características climáticas	23
VI.1.2. Geología	23
VI.1.2.1. Tectónica Regional.....	23
VI.1.2.2. Geología Local.....	25
VI.1.1. Geología Estructural	27
VI.1.2. Geomorfología	29
VI.1.3. Uso de Suelo	29
VI.1.4. Hidrología.....	31
VI.1.5. Hidrogeología.....	33
VI.1.5.1. Piezometría y Dirección de Flujo.	34
VI.1.5.2. Características Hidrogeológicas.	37
VI.1.5.3. Hidrogeoquímica.....	39
VII. MARCO CONCEPTUAL.....	41
VII.1. <i>Interacción entra las aguas subterráneas y las aguas superficiales.</i>	41
VII.2. <i>Contaminación de los Recursos Hídricos</i>	42
VII.2.1. Orígenes de la Contaminación de Aguas Superficiales y Acuíferos	43
VII.2.2. Mecanismos de contaminación de las aguas subterráneas.....	44
VII.3. <i>Técnicas Isotópicas</i>	45
VII.3.1. Medición y concentración de isótopos	46
VII.3.2. Fraccionamiento isotópico	47
VII.3.3. Relación entre las variaciones del ^2H y el ^{18}O en el agua	48
VII.4. <i>Hidroquímica de las Agua Subterráneas</i>	49
VIII. DISEÑO METODOLÓGICO	51
VIII.1. <i>Etapa 1: Revisión Bibliográfica</i>	51
VIII.2. <i>Etapa 2: Investigación de campo.</i>	51

VIII.2.1.	Reconocimiento del área de estudio.....	51
VIII.2.2.	Técnicas empleadas en la etapa de campo.....	52
VIII.2.2.1.	Piezómetros y Mini piezómetros.....	52
VIII.3.	Etapa 3: Muestreo y Análisis de Laboratorio.....	62
VIII.4.	<i>Etapa 4: Procesamiento y análisis de la información.</i>	71
IX.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
IX.1.	Geología.....	72
IX.2.	<i>Hidrogeología</i>	74
IX.2.1.	Niveles de agua	74
IX.2.2.	Gradiente hidráulico vertical en el área del lago Xolotlán	77
IX.3.	Hidroquímica	79
IX.3.1.	Parámetros físicos químicos de campo	79
IX.3.2.	Caracterización Hidroquímica	85
IX.3.2.1.	Aguas superficiales.....	85
IX.3.2.2.	Aguas subterráneas.....	88
IX.3.2.3.	Relación Química agua Superficial Agua Subterránea.....	94
IX.3.3.	Evolución Hidroquímica	99
IX.4.	Caracterización Isotópica.....	106
IX.4.1.	Comparación de la caracterización Isotópica.....	109
X.	Dinámica de la migración de sustancias desde el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca.....	113
X.1.	Cloruros.....	113
X.1.1.	Aguas superficiales:	114
X.1.2.	Aguas subterráneas:	114
X.2.	Sulfatos	119
X.3.	Sodio	121
X.3.1.	Aguas superficiales:	122
X.3.2.	Agua subterránea:.....	123
X.4.	Calcio y Magnesio	125
X.5.	Bicarbonato y Carbonato (HCO_3 y CO_3^{2-}).	126
X.6.	Sílice.....	127
X.7.	Alcalinidad	128
X.8.	Flúor	129
X.9.	Arsénico	133
X.9.1.	Arsénico en Pozos Perforados:.....	134

X.9.2.	Arsénico en pozos excavados.....	135
X.10.	Compuestos Nitrogenados (Nitrato, Amonio, Nitrito).....	138
X.11.	Boro.....	140
X.12.	Aluminio	141
X.13.	Cadmio.....	143
X.14.	Zinc	143
X.15.	Plaguicidas.....	144
X.16.	Herbicidas.	144
X.17.	Plaguicidas Organoclorados.	144
X.17.1.	Sedimentos:.....	145
X.18.	Plaguicidas organofosforados	146
X.18.1.	Sedimentos:.....	146
XI.	Conceptualización de la dinámica de migración de sustancias desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca.	147
XII.	Propuesta de Modelo Conceptual	153
XII.1.	Dinámica de Flujo.....	153
XII.2.	Hidroquímica e isótopos.....	155
XII.3.	Carga de Migración de compuestos.....	158
XII.4.	Fuentes de contaminación puntual	159
XIII.	Recomendaciones a la Gestión de la Zona Interlagos	162
XIV.	CONCLUSIONES.....	164
XV.	ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO	166
XVI.	RECOMENDACIONES	167
XVII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
XVIII.	ANEXOS	171

Índice de Figuras

Figura 1.	Área de estudio, zona de interlagos, inserta en la Subcuenca Tipitapa – Malacatoya.	18
Figura 2.	Tectónica de Placas de Centroamérica, tomado de Martínez W.	24
Figura 3.	Modelos de etapas de subducción de Nicaragua	25
Figura 4.	Geología Regional del área interlagos.	28
Figura 5.	Columna litoestratigráfica del acuífero interlagos Tisma. Tomado de Ineter (2010).	29
Figura 6.	Mapa de uso actual de suelo a lo largo del Río Tipitapa y vecindades.	30
Figura 7.	Mapa de Red de Drenaje, tomado de INETER (2010)	32
Figura 8.	Piezometría de la subcuenca Tisma Río Tipitapa.	36
Figura 9.	Mapa de Transmisividades Hidráulicas, tomado de INETER (2010).	38
Figura 10.	Mapa de Zonificación Hidroquímica, tomado de INETER (2010).	40
Figura 11.	Modelo esquemático de aporte de las aguas superficiales a las aguas subterráneas. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource.	41
Figura 12.	Relación entre aguas superficiales y subterráneas. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource.	42
Figura 13.	Relación entre de recarga y descarga entre un acuífero y lago. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource.	42
Figura 14.	Evolución del contenido de ^{18}O en el vapor de agua y precipitación durante la evaporación. Tomado de Clark y Aravena (1997)	47
Figura 15.	Línea Meteorica Mundial del Agua.	49
Figura 16.	Evolución iónica en las aguas subterráneas.	50
Figura 17.	Ubicación de Mini piezómetros.	56
Figura 18.	Ubicación de piezómetros en costas del Lago Xolotlán.	60
Figura 19.	Esquema del gradiente hidráulico de los piezómetros.	62
Figura 20.	Puntos de muestreo de isótopos	70
Figura 21.	Niveles de agua medidos en reconocimiento de campo desde la naciente del Río Tipitapa en el lago Xolotlán hasta su descarga al lago Cocibolca.	75
Figura 22.	Artesianismo observado en la zona interlagos.	76
Figura 23.	Cargas hidráulicas y gradiente hidráulico vertical en piezómetros ubicados en la naciente del Río Tipitapa y cercano a los termales Tipitapa.	78
Figura 24.	Relación entre el pH y la Conductividad Eléctrica de los Pozos Perforados y Excavados.	79
Figura 25.	Distribución espacial del parámetro Conductividad Eléctrica medida en los pozos excavados.	80
Figura 26.	Comportamiento espacial de la Conductividad Eléctrica en los Pozos Perforados, monitoreo 2011.	82
Figura 27.	Comportamiento espacial de la temperatura en muestreo de 2012.	84
Figura 28.	Diagrama de Piper en aguas superficiales.	86
Figura 29.	Conductividad Eléctrica en Aguas Superficiales y tabla con valores de Color, Dureza y Alcalinidad.	87
Figura 30.	Diagrama Schoeller en aguas superficiales.	88

Figura 31.	El tipo hidroquímico es proporcional al contenido de Sólidos Totales Disueltos	89
Figura 32.	Tipo Hidroquímico de Pozos Perforados ploteados en el diagrama de Piper.	91
Figura 33.	Tipo Hidroquímico de Piezómetros y Mini piezómetros	93
Figura 34.	Tipo Hidroquímico de fuentes hídricas.	96
Figura 35.	Distribución del tipo hidroquímico de aguas superficiales y subterráneas de la zona interlagos.	97
Figura 36.	Relación entre mili equivalentes de Cl+SO ₄ y Na +K.	98
Figura 37.	Relación iónica HCO ₃ / Cl ⁻ para aguas superficiales.	99
Figura 38.	Relación iónica HCO ₃ / Cl ⁻ para Piezómetros y Min piezómetros.	100
Figura 39.	Relación iónica HCO ₃ /Cl ⁻ para Piezómetros.	100
Figura 40.	Relación iónica HCO ₃ /Cl ⁻ para Pozos Excavados	101
Figura 41.	Relación iónica HCO ₃ /Cl ⁻ para pozos perforados.	102
Figura 42.	Transecto hidroquímico entre el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca	104
Figura 43.	Diagramas de Stiff de acuerdo al tipo hidroquímico del agua muestreada.	105
Figura 44.	Análisis del Contenido de Isótopos Estables en la Zona Interlagos en relación a la Línea Meteórica Mundial.	110
Figura 45.	Contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en muestras tomadas en la zona interlagos.	112
Figura 46.	Concentración de cloruros en aguas superficiales.	114
Figura 47.	Distribución espacial de cloruros en la zona interlagos	116
Figura 48.	Relación de $\delta^{18}\text{O}$ y Cloruros en muestras colectadas.	117
Figura 49.	Concentraciones de Cloruros, medidos en transecto del Perfil Hidrogeológico A - A tomado del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.	118
Figura 50.	Concentración de Sulfatos en aguas superficiales.	119
Figura 51.	Concentraciones de Sulfato en Pozos Perforados y Excavados.	120
Figura 52.	Concentraciones de Sulfato en Piezómetros y Mini Piezómetros.	121
Figura 53.	Concentración de Sodio en aguas superficiales.	122
Figura 54.	Concentración de Sodio en Piezómetros.	123
Figura 55.	Concentración de sodio en Mini piezómetros.	124
Figura 56.	Concentración de Sodio en Pozos Perforados.	125
Figura 57.	Relación entre la alcalinidad y el contenido de HCO ₃ , en muestra de agua.	128
Figura 58.	Concentración de Flúor en muestras superficiales.	129
Figura 59.	Concentraciones de Flúor en pozos perforados.	131
Figura 60.	Distribución espacial de Flúor en la zona de estudio.	132
Figura 61.	Concentraciones de Arsénico en aguas superficiales en diferentes eventos de muestreo.	134
Figura 62.	Concentraciones de Arsénico en Pozos Perforados.	135
Figura 63.	Concentraciones de Arsénico en Piezómetros.	136
Figura 64.	Concentraciones de Arsénico en Mini Piezómetros.	137
Figura 65.	Relación del Arsénico con el contenido de ^{18}O en pozos perforados y Piezómetros.	138

Figura 66.	Concentración de Boro en aguas superficiales, muestreo 2012 comparado con muestreo de 2010.....	140
Figura 67.	Concentración de Aluminio en Aguas Superficiales.	142
Figura 68.	Concentraciones de Aluminio en aguas subterráneas.....	142
Figura 69.	Concentración de Aluminio en Piezómetros y Mini piezómetros.	143
Figura 70.	Ubicación de los piezómetros.....	148
Figura 71.	Perfil físico químico que muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica en la columna de agua de los piezómetros.....	149
Figura 72.	Perfil que muestra el comportamiento del pH, profundidad contra el pH en los piezómetros.....	151
Figura 73.	Perfil que muestra el gradiente de la temperatura.....	152
Figura 74.	Modelo Conceptual de la zona interlagos.....	157
Figura 75.	Focos de Contaminación detectadas en el reconocimiento de campo.	161

Índice de Tablas

Tabla 1.	Coeficientes de almacenamiento zona interlagos, tomado de Arriola 2012.	34
Tabla 2.	Ubicación y especificaciones de MP instalados manualmente.	55
Tabla 3.	Ubicación de Piezómetros	61
Tabla 4.	Parámetros analizados y método de medición.	63
Tabla 5.	Sitios de Muestreo de Agua	66
Tabla 6.	Sitios de Muestreo en Sedimento	66
Tabla 7.	Plaguicidas analizados en muestras captadas en la zona interlagos.	67
Tabla 8.	Fuentes muestreadas para el análisis de isótopos estables.	69
Tabla 9.	Tipo Hidroquímico de pozos perforados.	90
Tabla 10.	Tipo Hidroquímico de Pozos Excavados	92
Tabla 11.	Tipo Hidroquímico Piezómetros y Mini piezómetros.	93
Tabla 12.	Composición Isotópica del lago Xolotlán	106
Tabla 13.	Composición Isotópica de Aguas Superficiales	107
Tabla 14.	Composición Isotópica de Mini Piezómetros.	107
Tabla 15.	Composición Isotópica de los Pozos Perforados	108
Tabla 16.	Composición Isotópica de los Pozos Excavados	109
Tabla 17.	Concentraciones de Calcio y Magnesio en Piezómetros y Mini piezómetros.	126
Tabla 18.	Concentraciones de compuestos nitrogenados en aguas superficiales.	138
Tabla 19.	Concentración de Nitratos, Nitritos y Amonio en Pozos Perforados y Excavados.	139
Tabla 20.	Plaguicidas en Sedimentos en ng/mg	147
Tabla 21.	Carga Contaminante	159

Índice de Anexos

Anexo 1:	Matriz de coeficientes de correlación de miliequivalentes de cationes y aniones de muestras de agua	171
Anexo 2:	Resultados de reconocimiento de campo en pozos perforados, 2011	172
Anexo 3:	Resultados contenidos de isótopos estables de 36 muestras de agua en la zona de los interlago	174
Anexo 4:	Resultados analíticos de Plaguicidas Organofosforados	176
Anexo 5:	Resultados de Plaguicidas Organoclorados	177
Anexo 6:	Resultados analíticos de herbicidas	178
Anexo 7:	Resultados Físico Químicos en muestras de aguas subterráneas, manantiales y aguas superficiales en la zona interlago	179
Anexo 8:	Resultados de metales y metaloides en zona de los interlagos	183
Anexo 9:	Curva de Gasto, Río Tipitapa elaborada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales	184
Anexo 10:	Memoria fotográfica de construcción e instalación de piezómetros	185

ABREVIACIONES

ALS	Acuífero Las Sierras
AS	Aguas superficiales
ASTM	American Society for Testing Material
AT-M	Acuífero Tipitapa Malacatoya
CAPRE	Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana
CCME	Guías Canadienses de Calidad Ambiental
CE	Conductividad Eléctrica
CIRA	Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua
ENACAL	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
ICP/MS	Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometer
IGG- CIGEO	Instituto de Geología y Geofísica
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
kgd-1	Kilogramos por día
LD	Límite de Detección
LMD	Límite de Detección Mínimo
LT	Laguna de Tisma
LX	Lago Xolotlán
MARENA	Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales
meq/L	Mili equivalentes por litro
mgL-1	Miligramos por litro
MN	Manantial
MP	Minipiezómetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NEA	Nivel Estático del Agua
ng L-1	Nanogramos por litro
OMS	Organización Mundial de la Salud
PE	Pozo Excavado
PP	Pozo Perforado
PZ/PM	Piezómetro
RT	Río Tipitapa
SPT	Ensayo de Penetración Normal
STD	Sólidos totales disueltos
ugkg-1	Microgramos por kilogramo
ugL-1	Microgramos por litro
UNT	Unidades Nefelométricas de turbidez
uS/cm	Microsiemens por centímetro
VMA	Valor Máximo Admisible
VR	Valor de Referencia

RESUMEN

El lago Cocibolca (8,144 km²), es considerado la reserva más importante para el suministro de agua de Nicaragua, por otro lado, el lago Xolotlán (1025 km²) ha sido contaminado por las actividades antropogénicas, diferentes estudios han identificado en este, contaminantes orgánicos e inorgánicos, que representan un riesgo para la salud pública. En eventos meteorológicos extremos ambos lagos son conectados superficialmente a través del río Tipitapa. En esta tesis se realizó una evaluación de la migración subterránea y superficial de contaminantes desde el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca. El área de estudio (235 Km²) se ubica en la zona interlagos y constituye la descarga de los acuíferos Las Sierras y Tipitapa – Malacatoya. Para evaluar la interacción entre los lagos y acuíferos se realizó un reconocimiento geológico, se perforó cuatro PZ de dos niveles (entre 6 y 35 m) en la costas del Xolotlán, específicamente en el área que nace el río Tipitapa, se instaló manualmente MP a lo largo del río y en las costas NO y SO del Cocibolca para interceptar los flujos de descarga regional y se tomó muestras para análisis físico químicos, isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$), metales pesados y plaguicidas. El Río Tipitapa corre a lo largo de un sistema de fallamiento de deslizamiento horizontal derecho y se desarrolla sobre dos ambientes tectónicos que origina la formación de bloques levantados y hundidos que condicionan el movimiento de las aguas subterráneas. En el área predominan tres tipos hidroquímicos: Bicarbonatadas Sódicas, Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas y Cloruradas Sódicas. El flujo profundo del acuífero Las Sierras es influenciado por la actividad termal, la cual también aporta Flúor y Boro. Tanto en los flujos profundos como en los subsuperficiales se detectó arsénico en un rango entre 7.07 a 29.38 $\mu\text{g L}^{-1}$. Las actividades antropogénicas tienen influencia significativa en el flujo subsuperficial, sobre todo en la zona de descarga al Lago Cocibolca. Basados en las composiciones isotópicas y en la hidroquímicas, el Lago Xolotlán ($\delta^{18}\text{O}$ -1.8, $\delta^2\text{H}$ -13.0) con una composición enriquecida no se conecta hidrogeológicamente con los acuíferos de la zona interlagos, cuya composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ -6.2, $\delta^2\text{H}$ -41.9), es empobrecida, por tanto se descarta la migración subterránea de los contaminantes y esta ocurre solo a nivel superficial, cuyo flujo es mitigado por la Laguna de Tisma, aminorando significativamente las concentraciones que finalmente llegan al Cocibolca. En el cauce del río Tipitapa se identificó la formación de una zona hiporreica a partir de las coordenadas 606 141 y 607 230 E; 1343 014 y 1343 500 N definida como una zona de transición que convergen y se produce intercambio entre las aguas superficiales y subterráneas.

Palabras claves: migración contaminante, Xolotlán, Cocibolca, isótopos estables, hidroquímica, Río Tipitapa, zona interlagos, Planicie Tipitapa.

I. INTRODUCCIÓN

La depresión de Nicaragua es especialmente importante porque contiene los Lagos Cocibolca y Xolotlán, los que eventualmente se comunican de forma superficial a través del Río Tipitapa. Se presume una conexión subterránea que se aborda en este trabajo de Tesis.

El lago Xolotlán o de Managua con un área de 1025 km², ha sido contaminado producto de las descargas de aguas residuales, domésticas e industriales de la ciudad de Managua desde 1927, hasta la entrada en operación de la Planta de Tratamiento Augusto C. Sandino en el año 2005. Al respecto, diferentes estudios han identificado la presencia de contaminantes inorgánicos y orgánicos, los cuales representan un riesgo para la salud pública y un deterioro para el ecosistema acuático del lago. (ENACAL 2010, CIRA, 2010).

El lago Cocibolca con un área de 8,144 km², es considerado la reserva natural más importante para el suministro de agua de Nicaragua. Desde el punto de vista físico-químico, sus aguas son consideradas de buena calidad, aptas para consumo humano, riego, uso industrial, recreación u otro fin al que sea destinada.

Ambos lagos constituyen dos cuencas independientes, sin embargo, a partir del paso del Huracán Mitch en octubre de 1998, se restableció el flujo superficial de agua del lago Xolotlán al lago Cocibolca, a través del Río Tipitapa (35 km de longitud), el cual no fluía desde 1910. Este fenómeno sucede en eventos extremos, en donde el nivel del lago Xolotlán sobrepasa la cota 40.20 m.s.n.m.

El cauce del Río Tipitapa de 35 km de longitud conecta el lago Xolotlán (39, 20 m.s.n.m.) al lago Cocibolca (31 m.s.n.m.). De esta manera, el agua descargada al Río Tipitapa representa una vía para la migración de los contaminantes del lago Xolotlán al lago Cocibolca.

En el año 2010, el Centro para la Investigación de Recursos Acuáticos (CIRA-UNAN), el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARENA), realizaron un monitoreo del sistema Lago Xolotlán - Río Tipitapa - Lago Cocibolca, con el fin de evaluar si la conexión superficial influía sobre la calidad del agua del Lago Cocibolca. El objetivo fue determinar la migración de contaminantes tales como metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes y sales disueltas de un lago a otro. Este estudio contempló la migración de contaminantes a nivel superficial. Sin embargo, para evaluar la magnitud del impacto también es necesario analizar la conexión subsuperficial y subterránea como estudio integral de los procesos y vías de contaminación.

La presente tesis de investigación, tiene por objetivo, evaluar la migración de contaminantes desde el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca, determinando la posible conexión hidrogeológica entre estos cuerpos de agua. Para definir esta conexión se utilizaron métodos hidroquímicos e isotópicos (^{18}O , ^2H). El trabajo ha concluido que, bajo las condiciones de este estudio, no se establece una conexión subterránea definida y la migración de contaminantes de un lago a otro solo ocurre a nivel superficial, a través del Río Tipitapa. Se ha determinado que las actividades desarrolladas en la zona interlagos (zona de las unidades hidrológicas) influyen sobre la calidad del agua del río Tipitapa y la laguna de Tisma.

Los resultados de esta investigación sirven de base para la justificación de actividades en los planes de gestión de los humedales de Tisma y del lago Cocibolca. Estos planes deben encaminarse a la protección del agua de Lago Cocibolca, considerado reserva natural para consumo humano. Así mismo debe trabajarse en acciones para la recuperación de la calidad del agua del Río Tipitapa y la Laguna de Tisma.

II. ÁREA DE ESTUDIO

Se ha cubierto un área de aproximadamente 235 Km². El área de estudio se ubica en la denominada zona interlagos, la cual representa la zona de descarga de dos acuíferos importantes: el acuífero Regional Las Sierras y del acuífero local Tipitapa – Malacatoya. Figura 1.

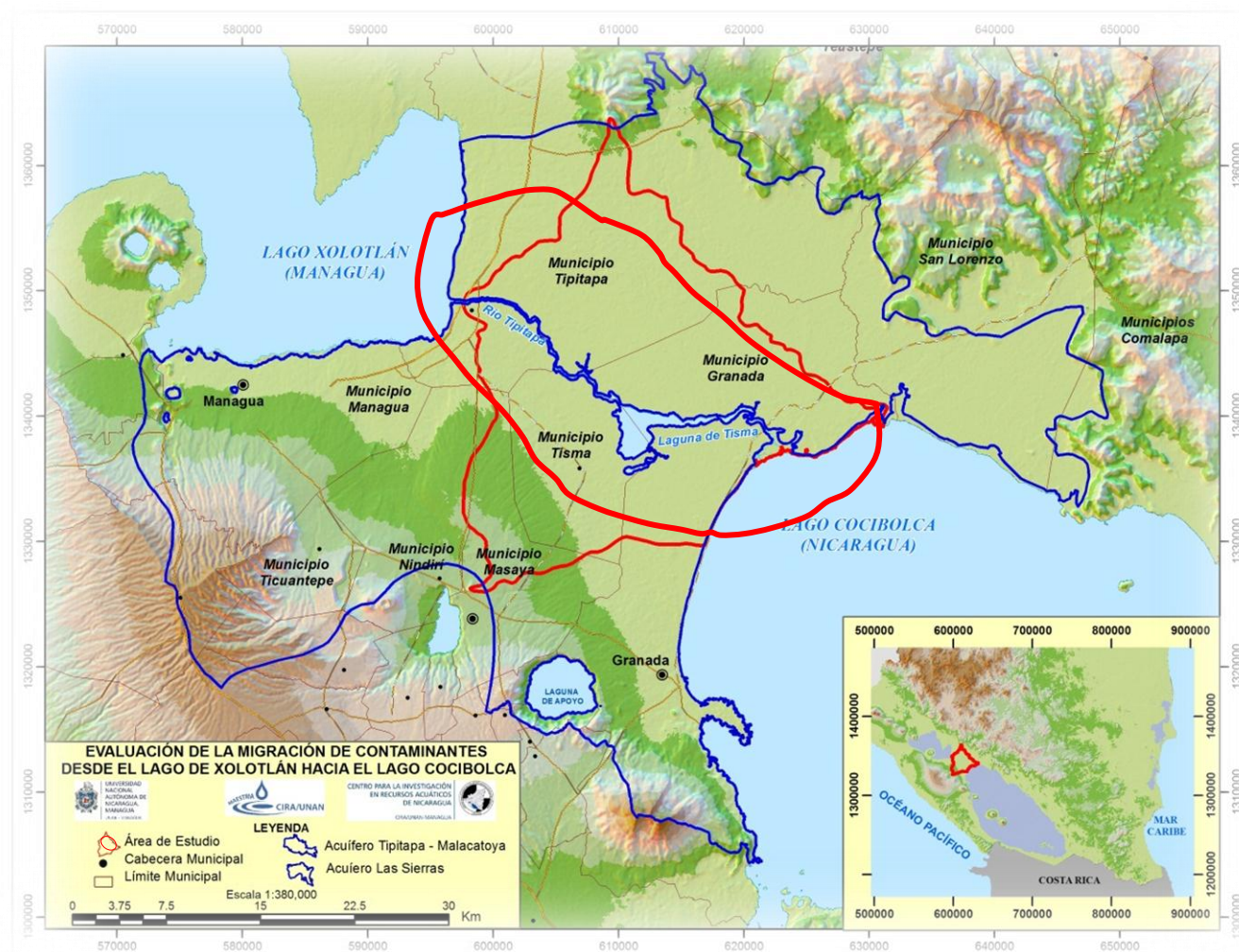


Figura 1. Área de estudio, zona de interlagos, inserta en la Subcuenca Tipitapa – Malacatoya.

III. ANTECEDENTES

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), en investigaciones realizadas en el año 1997, cuantificó los componentes subterráneos y superficiales del balance hídrico del lago Xolotlán empleando técnicas isotópicas. Las principales conclusiones de este estudio manifiestan que el Lago es un cuerpo bien mezclado en todo su volumen durante todo el año, con una composición isotópica media igual a $\delta^{18}\text{O} = 0.0 \pm 0.1\text{‰}$ y un tiempo de renovación relativamente corto (3 años). Entre los componentes de entradas y salidas del sistema del Lago, el estudio señaló una posible salida subterránea del lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca, inmediato a la naciente del Río Tipitapa. Los investigadores explican que la composición isotópica en ese intervalo de tiempo que presentó el lago es originada por una salida subterránea del sistema, además cuestionan que si no existiese tal salida la composición isotópica sería significativamente diferente a la observada.

No obstante, a pesar que este estudio compara el Balance Isotópico y el Balance Hídrico, advierten que los escurrimientos subterráneos de entrada y salida del Lago, han sido sobreevaluados, debido probablemente, a la dificultad en obtener parámetros isotópicos representativos de las condiciones hidrológicas en la cuenca, por tanto, es necesario realizar estudios que expliquen cuál es la relación entre el Xolotlán y los acuíferos adyacente, en especial interés en el área de la naciente del Río Tipitapa.

Por otro lado, la reactivación del escurrimiento superficial del Río Tipitapa, a partir del paso del Huracán Mitch en octubre de 1998, motivó en 2010 un estudio conjunto entre el INETER y el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA/UNAN- Managua), enfocado a evaluar el impacto inducido en la calidad de las aguas del lago Cocibolca provenientes del lago Xolotlán.

El estudio plantea que existe transporte a nivel superficial de metales pesados (arsénico y cobre), nutrientes, carga orgánica, sólidos y sales disueltas, lo que originó disminución en la transparencia, aumento en conductividad eléctrica, leve aumento en la dureza, alcalinidad total y sólidos totales en la desembocadura Río Tipitapa – lago de Cocibolca (CIRA, 2010). Como sistema complejo, el estudio deja planteado que la tasa de transferencia de metales pesados, nutrientes y otros contaminantes entre los lagos, es amortiguada por el ecosistema de la Laguna de Tisma, que funcione como depurador. Esto se observó en la tendencia de las concentraciones a lo largo del sistema lago de Xolotlán – Río Tipitapa - Tisma – lago Cocibolca. Después que el flujo superficial pasa por la Laguna de Tisma, se

registra disminución significativa en la concentración de los contaminantes y en la carga de nutrientes.

En el año 2010, INETER analizó 20 muestras de aguas subterráneas (pozos excavados y perforados) a lo largo del Río Tipitapa y su área de influencia. En este estudio se evidenció cambios en las características hidrogeoquímicas de iones mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , CO_3^- , HCO_3^{-2} , SO_4^{-2}). Los cambios observados en la hidrogeoquímica son atribuidos a una posible influencia de las aguas contaminadas del lago Xolotlán.

Referente a la hidrología del Río, diferentes autores describen que probablemente este dejó de fluir a raíz de los eventos sísmicos del Sistema de Falla Cofradía ocurridos en diciembre 1865 a febrero de 1866, lo cual posiblemente ocasionó levantamiento tectónico del terreno (en Leeds 1974). Como ya se ha mencionado el caudal del Río se reactiva cuando el nivel del Lago Xolotlán sobrepasa la cota 40.20 m.s.n.m, durante eventos extremos de precipitación.

IV. JUSTIFICACIÓN

Tal como se describió en los párrafos anteriores la comunicación entre ambos lagos se efectúa través del Río Tipitapa en eventos extraordinarios. Bajo estas condiciones, el medio propicia una vía para la migración de sustancias presentes en el Lago Xolotlán, que comprometen la calidad del agua del Lago Cocibolca. Esta situación es preocupante ya que el lago Cocibolca es considerado la reserva de agua dulce más importante para Nicaragua. Actualmente las ciudades de Juigalpa en Chontales y San Juan del Sur, en Rivas, tienen como fuente de agua al Lago Cocibolca.

En 1910, a raíz de un evento meteorológico extremo (en Leeds 1974), se restableció la comunicación entre los lagos, desde entonces el flujo superficial ha sido intermitente. Con el paso del huracán Mitch en 1998, cuando el Lago Xolotlán alcanzó y sobrepasó la cota de 39.20 m.s.n.m, el río volvió a fluir superficialmente, conectando ambos lagos representando un peligro potencial de contaminación al lago Cocibolca.

Considerando que el Lago Xolotlán de 1049 km², sufre un acelerado proceso de contaminación, originado, por las descargas de aguas residuales sin tratar de la ciudad de Managua en años pasados y por las descargas de sedimentos y nutrientes de su cuenca de drenaje (~ 4700 km²), y la descarga de la actual planta de tratamiento, y que el Lago Cocibolca con 8144 km², constituye la reserva más importante de agua para consumo humano de Nicaragua y resto de la Región de Centro América, y que el Río Tipitapa sirve de canal de comunicación entre estos cuerpos de agua, es de suma importancia conocer la relación hidrológica entre ambos lagos y determinar la dinámica de transporte de sustancias.

En el contexto anterior es necesario definir, la relación hidrogeológica entre ambos lagos y la dinámica del transporte de sustancias en este sistema producto de la hidrodinámica cambiante del Río.

V. OBJETIVOS

V.1 Objetivo General

Evaluar la migración de contaminantes desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca.

V.2 Objetivos específicos

Definir la dinámica del sistema hídrico Lago Xolotlán, río Tipitapa, Laguna de Tisma y Lago Cocibolca.

Determinar el flujo de sustancias contaminantes mediante técnicas hidroquímicas e isotópicas desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca

Definir de forma integral la dinámica de flujo y migración de sustancias Contaminantes entre el Lago Xolotlán y Cocibolca.

VI. MARCO TEÓRICO

VI.1. Caracterización Físico Natural

VI.1.1 Características climáticas

El clima de la zona interlagos también llamada Planicie de Tipitapa, se caracteriza por tener temperaturas cálidas a lo largo del año entre los 25 y 27, 5 °C. Existen dos estaciones marcadas, seca y lluviosa. La estación lluviosa ocurre generalmente entre los meses de mayo y noviembre con una duración de siete meses. Entre los meses de julio y agosto se prolonga una estación seca, marcada por los decrecimientos significativos de precipitaciones. Se registran precipitaciones promedio de 1100 mm.

De acuerdo a la clasificación de Köppen (1928) modificado, el clima del área de estudio se conoce como Sabana Tropical (Aw), los valores de evaporación anual (en la cuenca del Lago Xolotlán) oscilan entre 2300 y 2700 mm (INETER, 2010).

VI.1.2 Geología

VI.1.2.1 Tectónica Regional

El área de interlagos se inserta en la Planicie de Tipitapa, entre el Lago Xolotlán al Oeste y el Lago Cocibolca al Este, en esta área se emplaza el Río Tipitapa. La Planicie es parte del terreno geológico relativamente nuevo de la Depresión de Nicaragua.

El río Tipitapa y la planicie, se desarrolla en un ambiente de terreno volcánico joven del Plio-Pleistoceno (60 mil a 200 mil años atrás), el cual separa los dos cuerpos de agua de edades y ambientes geológicos contrastantes (el Lago Xolotlán, menor a 100 mil años y el Lago Cocibolca de 3 a 1 millón de años atrás). Esto implica una dinámica de cambio constante desde el emplazamiento del río y cambios perceptibles en casos de ocurrencia de eventos sísmicos y meteorológicos extremo.

La Depresión de Nicaragua se ha formado como producto de la subducción de la placa oceánica de Cocos por debajo de la Placa Continental Caribe. Este proceso de subducción da origen a dos esfuerzos, uno con orientación NE y otro paralelo al plano de subducción de dirección NW. En la orientación NE prevalecen las

fallas normales y en la orientación NW las fallas de deslizamiento horizontal (strike slip).

La inclinación de la placa de Cocos, en subducción de oblicua a subvertical (80°), implicó la migración al Oeste de la Cadena Volcánica y la formación por extensión y ruptura continental de un nuevo terreno denominado Depresión de Nicaragua con orientación NW. Esto significa que, en la Depresión, se estacionó el vulcanismo que venía migrando de la parte central de Nicaragua hacia el Oeste, distinguiéndose un vulcanismo primitivo de 1, 6 millones a 200 mil años atrás y el establecimiento del frente volcánico o cadena de volcanes activos, los cuales se emplazaron de 500 a 300 mil años atrás. Figura 2.

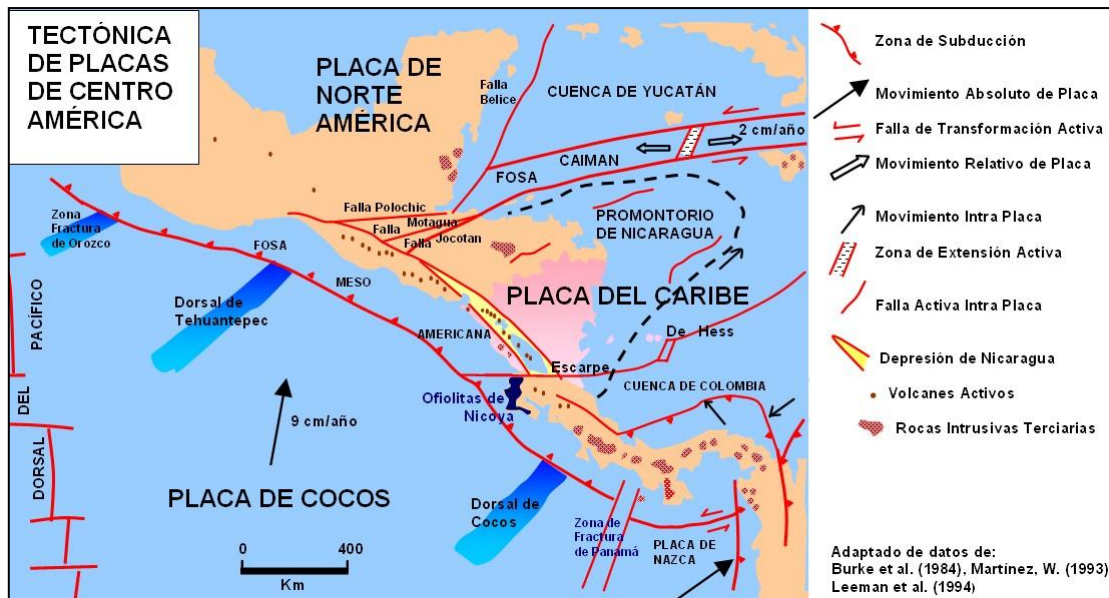


Figura 2. Tectónica de Placas de Centroamérica, tomado de Martínez W.

En el ambiente de la Depresión de Nicaragua resalta la formación de los dos grandes lagos, Xolotlán y Cocibolca, entre los cuales se ubica el curso del Río Tipitapa. Tanto los lagos como el río tienen su origen y su evolución en el control tectónico del área. La Figura 3, ilustra la dinámica tectónica del área.

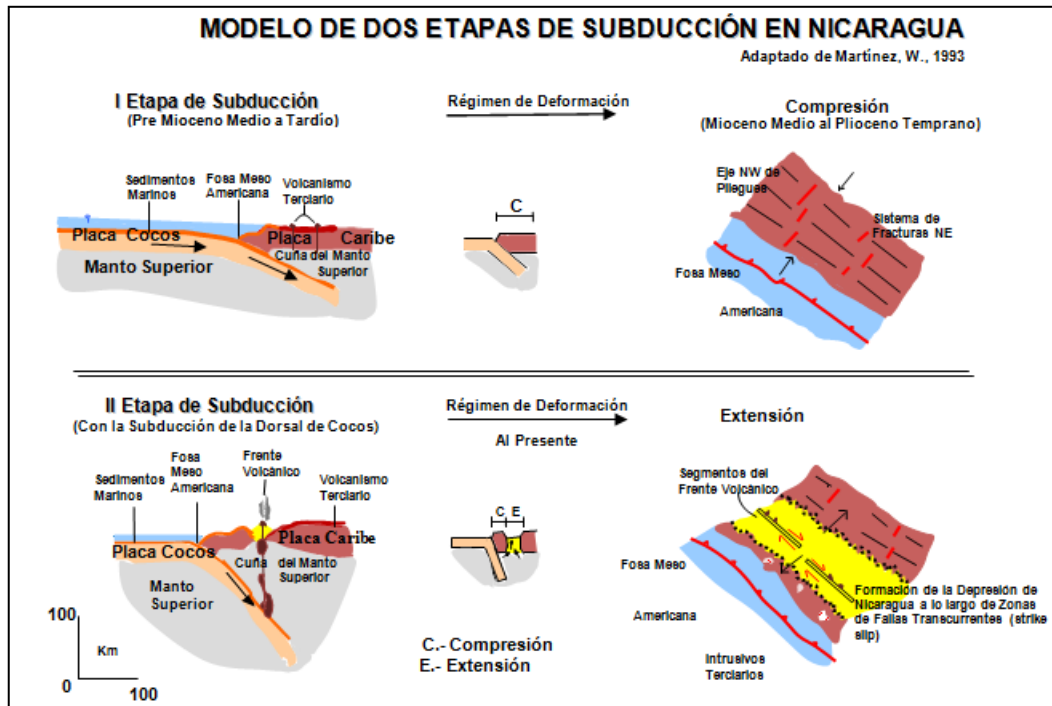


Figura 3. Modelos de etapas de subducción de Nicaragua

VI.1.2.2 Geología Local

Las unidades geológicas reconocidas en el área estudiada y sus alrededores, enumerados de la más antigua a la más reciente son: Grupo Coyol (Tpcd), Grupo Las Sierras (TQps), Depósitos Cuaternarios residual (Qr). y Depósitos Cuaternarios aluvial (Qal) Figuras 4 y 5.

Grupo Coyol (Tpcd): De edad Mioceno Superior –Plioceno, forma la unidad basal en los sectores Norte y Noreste de la planicie, está constituido por una secuencia de rocas volcánicas compuestas de aglomerados andesíticos, basaltos, piroxeno, ignimbritas y lavas basálticas. Esta formación aflora en los sectores de las comunidades de San Roque, Empalme de San Benito, comarca Los Laureles (INETER, 2010). Es importante destacar que en la zona de estudio seleccionada no se encontró el afloramiento de esta formación. Su descripción en este apartado es para definir qué formación constituye el basamento hidrogeológico.

Formación Las Sierras (TQps) La formación geológica Las Sierras, aflora en las costas del lago Xolotlán, en el lecho del río Tipitapa y al sureste de la laguna de Tisma. En las riberas del río, próxima a la desembocadura al lago, así como en la base del puente cerca de los termales de Tipitapa se muestra fuertemente meteorizada.

Esta formación está constituida por toba, una roca piroclástica, de permeabilidad primaria formada por la litificación de cenizas, arenas u otros elementos volcánicos. Es notoria la presencia de un intenso fracturamiento paralelo y transversal al curso del río, lo que le confiere también una alta permeabilidad secundaria, esta formación también se presenta en bloques de diaclasamiento, como el afloramiento de toba que se encuentra en la base del puente en el Río Tipitapa (INETER, 2010)

Las Sierras forman uno de los principales acuífero del área y constituye una de las fuentes principales de suministro de agua potable para la ciudad de Managua y sus alrededores.

Cuaternario aluvial (Qal): Estos sedimentos ocupan el área circundante de las costas del lago Cocibolca. Se extienden hacia el Noreste y Sur del paso de Panaloya, disminuyen su extensión a medida que se aproxima a la ciudad de Granada. Las comarcas de Malacatoya, cuya escasa elevación en relación con el espejo del lago Cocibolca, son vulnerables a inundaciones en períodos de lluvia, lo cual tiene como consecuencia la acumulación de detritos. La composición litológica que conforma esta sedimentación, en sectores con cultivos, es generalmente arenosa color pardo claro a pardo oscuro, de granulometría gruesa en combinación con limos y poca arcilla; así como de la presencia en la matriz, de gravas subangulares a subredondeadas hasta de ¼ de pulgadas de diámetro.

Cuaternario residual (Qr): Ocupa la mayor extensión del estrecho, se extiende desde el extremo Este de la ciudad de Tipitapa hasta las inmediaciones del poblado Las Banderas. Por el Norte, se aproxima a la comunidad de San Benito y un poco más al sur del paso Panaloya en dirección a la ciudad de Granada, La composición es limo arcilloso color pardo a café claro. Suprayacen a las tobas consolidadas de la formación Las Sierras. En períodos constante de lluvias presenta un comportamiento uniforme, se satura y filtra agua de manera lenta hacia el subsuelo, en cambio, sus partículas se contraen en periodo seco, formando grietas.

VI.1.1.Geología Estructural

La Planicie de Tipitapa, está situada en el borde Este del Graben Aeropuerto y del Graben de Managua, respectivamente, limitando al Oeste con el Lago Xolotlán.

Desde el punto de vista geológico estructural, la Planicie de Tipitapa se divide en dos unidades morfo-tectónicas contrastantes: 1.- La Porción Occidental más baja, de los 39 a los 47 m.s.n.m. 2.- La Porción Oriental más elevada, de los 50 a los 69 m.s.n.m.

El rasgo geológico más prominente del área de estudio lo constituye el sistema de fallas Cofradía, el cual limita el graben de Managua. El sistema consiste de una serie de fallas normales escalonadas con una inclinación al Oeste y una longitud de 37 km aproximadamente (Rubí, 2011). Arce (1973) citado por (Rubí, 2011) ha atribuido un desplazamiento del orden de 250m al grupo Las Sierras.

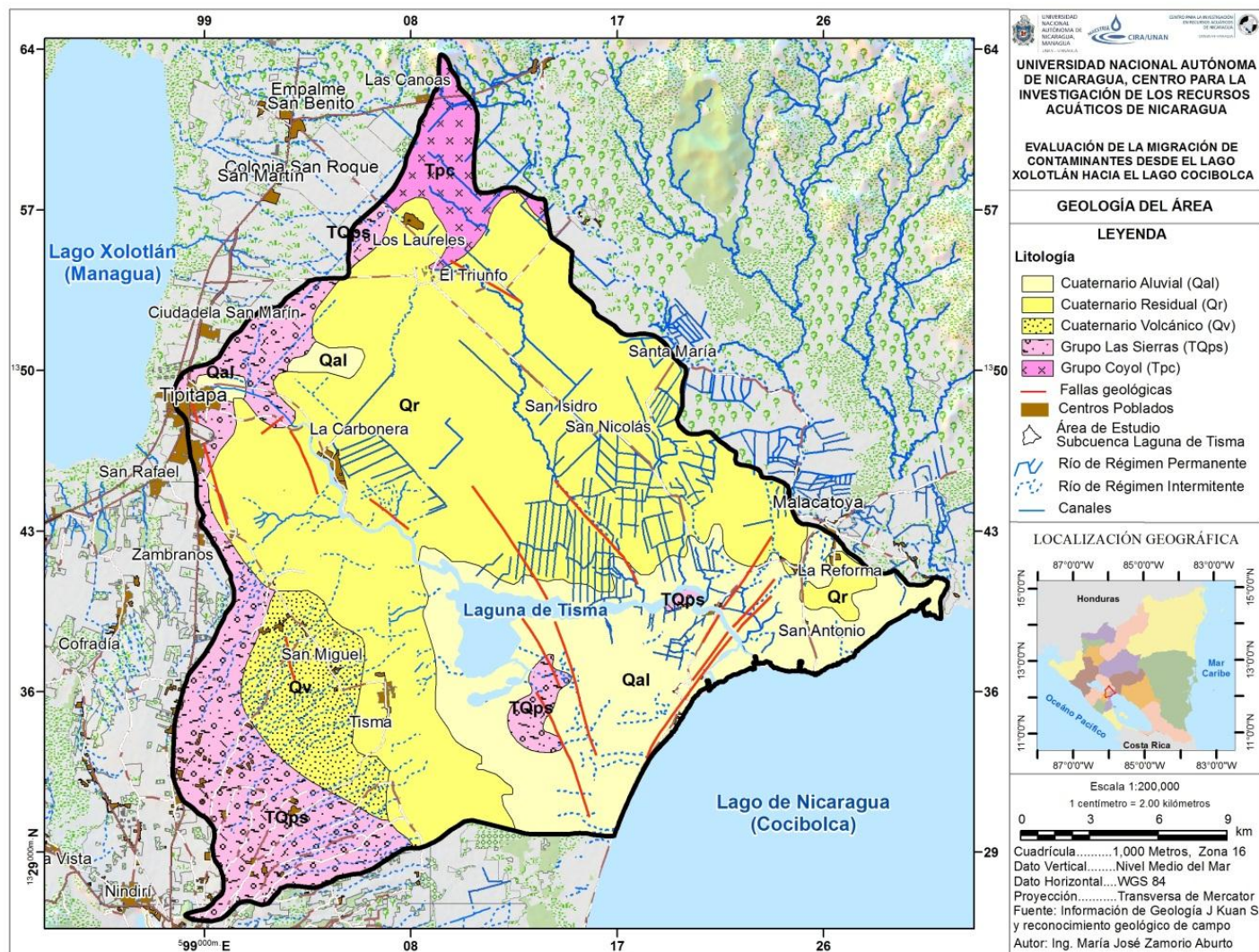


Figura 4. Geología Regional del área interlagos.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
C E N O Z O I C A	CUATERNARIO	Reciente	30	Qr	Arena, limo, grava y arcilla.
			100	Qv	Arena negra escoriácea.
		Pleistoceno	200	TQps	Arena, escoria, pómez, limo , suelo fósil.
	MIOCENO	Plioceno			
		Mioceno	1200	Tp cb	Andesitas basálticas y tobas andesíticas.

Figura 5. Columna litoestatigráfica del acuífero interlagos Tisma. Tomado de Ineter (2010).

VI.1.2 Geomorfología

La cuenca se caracteriza por una morfología baja ondulada, con elevaciones de 40 hasta 100 metros sobre el nivel del mar. A largo del Río Tipitapa se forma la laguna de Tisma y afloran una serie de riachuelos y manantiales.

PROCONSULT (1984), citado por Arriola (2012) describe que la zona interlagos forma una planicie, con una inclinación de pendiente moderada, en dirección al lago Xolotlán, Río Tipitapa y al lago Cocibolca. Las elevaciones topográficas varían entre 30 m.s.n.m. (inmediaciones de la laguna de Tisma y sectores costaneros del lago Cocibolca y 106.5 m.s.n.m. (vecindades de la población Las Banderas). El área de estudio en particular tiene una elevación mínima de 31.1 m.s.n.m. y una elevación máxima de 48 m.s.n.m.

VI.1.3 Uso de Suelo

El 90% del territorio de la cuenca Tisma - Malacatoya, es utilizado para los cultivos. En la parte baja se cultiva principalmente arroz; en las partes altas del sector Sur predominan cultivos como maíz, frijoles y maní. Para estos cultivos se utilizan plaguicidas y fertilizantes para mejorar el rendimiento. En la parte media, cercanos a las comarcas Zambrano y parte Tisma predominan pastizales utilizados para la crianza del ganado. Figura 6.

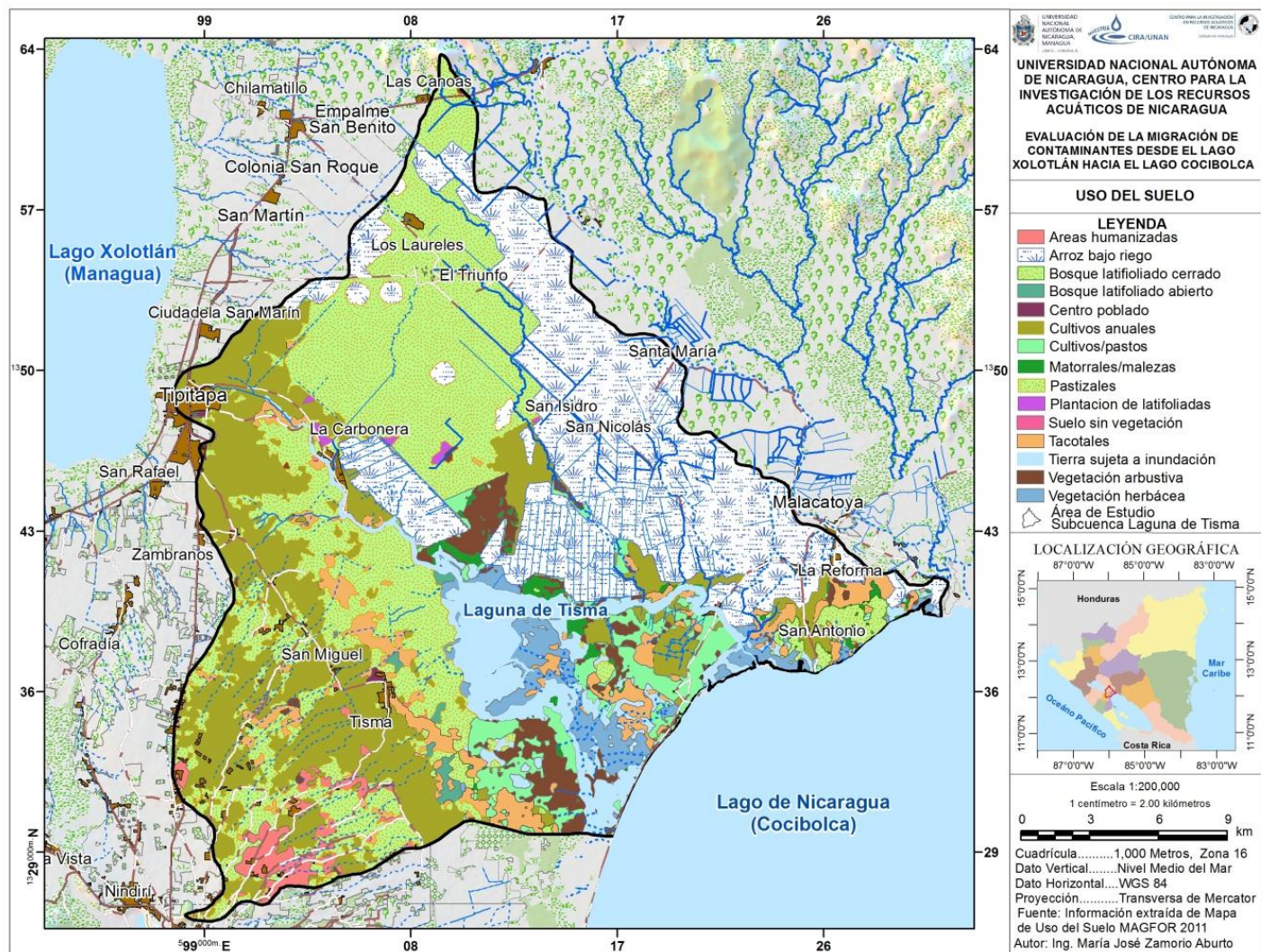


Figura 6. Mapa de uso actual de suelo a lo largo del Río Tipitapa y vecindades.

Las sustancias utilizadas en los cultivos se incorporan a la escorrentía que drena al Río Tipitapa o la Laguna de Tisma, estos posteriormente pueden ser acarreados al Lago Cocibolca.

VI.1.4 Hidrología

El principal rasgo hidrológico del área de interlagos o Planicie de Tipitapa constituye el río Tipitapa, con una longitud de 35 km. El Río fluye desde el lago Xolotlán sólo cuando este sobrepasa la cota de 39.21 m.s.n.m., condición que generalmente ocurre en eventos meteorológicos extremos como en el máximo histórico de 43.6 m.s.n.m registrado en los años 30 y más recientemente al paso del Huracán Mitch en el año 1998, alcanzando los 42.72 m.s.n.m. Los eventos extremos influyen de manera significativa en el comportamiento de la hidrodinámica del Río Tipitapa; el Huracán Mitch produjo nuevamente el escurrimiento del río, desde el Lago Xolotlán, alterando el comportamiento hidráulico de la zona. El río une hidrológicamente los grandes lagos de Nicaragua, el lago Xolotlán y el lago Cocibolca.

Aunado a lo anterior, existen registros históricos en el que hacen referencia en un cambio topográfico del río Tipitapa (Leeds 1974), originado por sismos muy fuertes registrados en el área entre diciembre de 1865 y febrero de 1866. Los sismos originaron un levantamiento tectónico del terreno, con lo cual se cortó por completo el flujo superficial del Río entre el lago Xolotlán y el lago de Cocibolca.

Ineter (2011) citado por Arriola (2012) señala que el Río Tipitapa mantiene un caudal base de $0.036 \text{ m}^3/\text{s}$. En inviernos en que el río nace en el lago Xolotlán calculó un caudal máximo de $241 \text{ m}^3/\text{s}$ y un mínimo de $18 \text{ m}^3/\text{s}$.

El cauce del Río Tipitapa se emplaza sobre un terreno tectónicamente activo y reciente. El cauce del río se emplaza a lo largo de fallas de deslizamiento horizontal lateral derecho. Su nacimiento es concomitante al origen y emplazamiento tectónico del lago Xolotlán. Por lo tanto, es posible una interacción del sistema del río con el acuífero; como efluente o influente. El sistema se define como acuífero – fractura - río. Las fracturas pueden ser vías preferenciales de o barrera con reservorios de baja transmisividad.

El río constituye la principal vía que transporta las aguas del Lago Xolotlán, hacia la Laguna de Tisma y luego al Lago Cocibolca, así como el drenaje desde las partes altas del Este y Oeste.

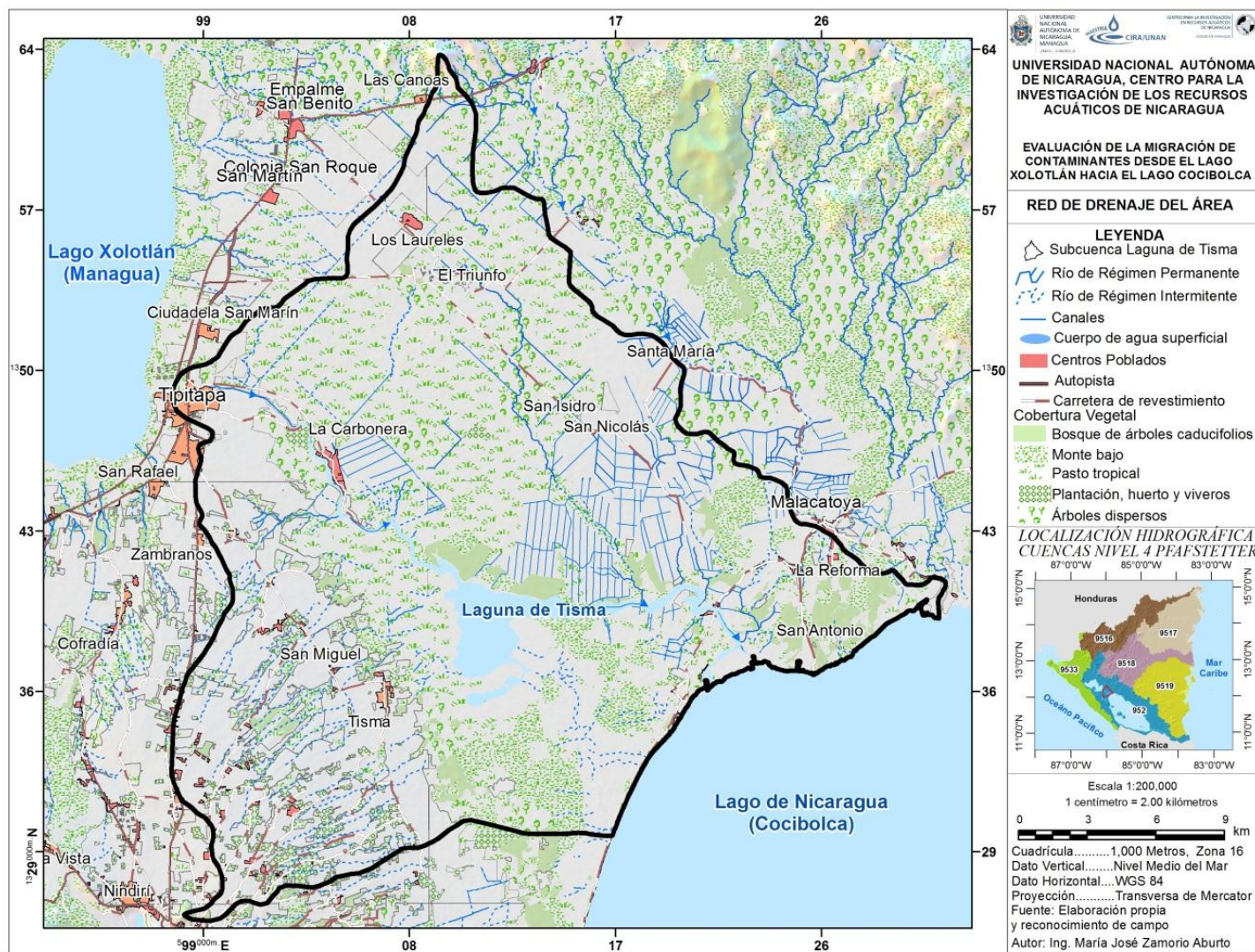


Figura 7. Mapa de Red de Drenaje, tomado de INETER (2010)

VI.1.5.1 Hidrogeología

Las zonas alrededor de los lagos Xolotlán y Cocibolca, se comportan como áreas de convergencia de los flujos subterráneos regionales y de descargas de la zona de drenaje desde diferentes puntos cardinales. El área al Norte del curso del Río es parte del acuífero Tipitapa - Malacatoya, el cual comprende una superficie de aproximadamente 938 Km² y ocupa el centro de la planicie de Tipitapa. El área Sur corresponde al acuífero regional Las Sierras.

A nivel regional el área de estudio se ubica en la Provincia hidrogeológica Pacífica y a nivel semiregional en la Subprovincia de la Depresión de Nicaragua (Krásný, 1998). En la Subprovincia se desarrollan acuíferos y acuitardos, definidos por las diferentes unidades geológicas: Grupo Las Sierras, Grupo Managua y otras formaciones de origen volcánico de edad Cuaternaria hasta Terciaria, parcialmente cubiertos por depósitos cuaternarios aluviales, coluviales, etc. Los materiales volcánicos compuestos de arenas gruesas a medias, arenisca, ceniza fina, escorias, pómez, conglomerados y gravillas gruesas. Estas pueden presentarse semicompactas y compactas y presentan un medio poroso bastante permeable.

El medio hidrogeológico en general está constituido, principalmente por depósitos de la Formación Las Sierras. La base impermeable o de menor permeabilidad de este sistema acuífero, está formada por depósitos volcánicos Terciarios hacia el Norte y Noroeste (tobas compactas y lavas) y por depósitos sedimentarios cretácicos de la formación Rivas al Sur y Sureste.

Los productos del Grupo Las Sierras al Sur y Suroeste, en predominio de piroclastos, cenizas finas, pómez y lapilli, poseen buena permeabilidad para la circulación y el almacenamiento del agua subterránea.

Los materiales aluviales y coluviales, tales como gravas, arenas gruesas a finas, limos y arcillas, localizados a lo largo del curso de los principales ríos del área, en las planicies de inundación y en las zonas costeras, pueden representar buenos acuíferos.

Las formaciones geológicas que definen unidades hidroestratigráficas del área son:

Formación Las Sierras (QPs): Constituye el medio acuífero libre, semiconfinado y confinado: El medio hidrogeológico lo constituyen depósitos finos de arena y

pómez, tobas aglomeradas, suaves líticas, piroclásticos gruesos y lapilli, depositados sobre aguas someras.

Depósitos Aluviales del Plio Holoceno – Pleistoceno (Qal) (TQal): litológicamente formada por depósitos de arenas cuarzosas redondeadas, capas de pómez y arcillas verdosas – grisáceas, tienen presencia de conchas de gasterópodos y pectinas, con un espesor mayor de 200 m, depositados en ambientes costeros o cerca de las costas, contemporáneos con el Grupo Las Sierras (Chan, Montgomery, 1981). Esta formación está intercalada e interdigitada con La Formación Las Sierras (Corporation In Joint Venture With Marshall & Stevens Incorporated and Internacional Aero Services Corporation, 1969).

Los depósitos aluviales antiguos (TQal) parecen aumentar de espesor en la parte central de la depresión, siendo mayor en las áreas cercanas al Lago Cocibolca. (Corporation In Joint Venture With Marshall & Stevens Incorporated and Internacional Aero Services Corporation, 1969) estimó permeabilidades de 28, 6 m/d en esta unidad, la cual se considera buen acuífero.

En pruebas de bombeos realizadas para pozos localizadas en la planicie de Tisma (Chan, Montgomery, 1981) determinó un coeficiente de almacenamiento de 0.001, indicando la presencia de un acuífero confinado en el sector.

Arriola (2012) asumió para la construcción del modelo conceptual del área de los interlagos un valor promedio de 0.13, tomando como referencia seis valores diferentes obtenidos en pruebas de bombeos en los sectores sur occidental y central del área. La siguiente tabla muestra los coeficientes para el área de Interlagos. No obstante, también se registró un valor de 1×10^{-6} , que infiere la existencia de condiciones semiconfinantes a confinantes.

Tabla 1. Coeficientes de almacenamiento zona interlagos, tomado de Arriola 2012.

Coeficiente de almacenamiento	0.20	0.20	1×10^{-6}	0.1	0.06	0.10	0.13
--------------------------------------	------	------	--------------------	-----	------	------	------

VI.1.5.1 Piezometría y Dirección de Flujo.

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) dispone de un inventario de 346 pozos, de los cuales el 44 % (158) son pozos excavados, el restante 56% (188) son perforados y dos manantiales. El agua subterránea en la zona es utilizada para riego, ganadería, usos domésticos y potables.

Los niveles de agua en la cuenca Tipitapa – Malacatoya en los pozos perforados oscilan desde 0.2 m hasta 119.9 m (poblado Bálsamo). En los pozos excavados las profundidades mínimas y máximas van desde 0.07 m y a 81.66 m.

Tanto el sector oriental del Acuífero Las Sierras y el Acuífero Tipitapa Malacatoya descargan al Río Tipitapa que luego drena superficialmente al Lago Cocibolca. De acuerdo a la piezometría, ambos acuíferos difieren en la permeabilidad y magnitud del gradiente hidráulico. El Acuífero las Sierras tiene un gradiente hidráulico más pronunciado, indicando mayores velocidades, puede relacionarse con mayor permeabilidad. El acuífero Tipitapa Malacatoya presenta menor velocidad con gradientes hidráulicos horizontales.

El mapa piezométrico (INETER, 2010), con datos promedios del período 2003 a 2010, muestra la ocurrencia de un flujo predominante desde el Suroeste hacia el Río Tipitapa y un flujo desde el Noroeste hacia el Río, Tisma y al lago Cocibolca, bajo estas condiciones no se observa una conexión subterránea entre ambos lagos, sin embargo, la hipótesis planteada en esta investigación sugiere la existencia de un flujo profundo entre ambos lagos y cuya descarga puede interceptarse en las costas Sur y Este del lago Cocibolca , áreas en que se instalaron los mini piezómetros.

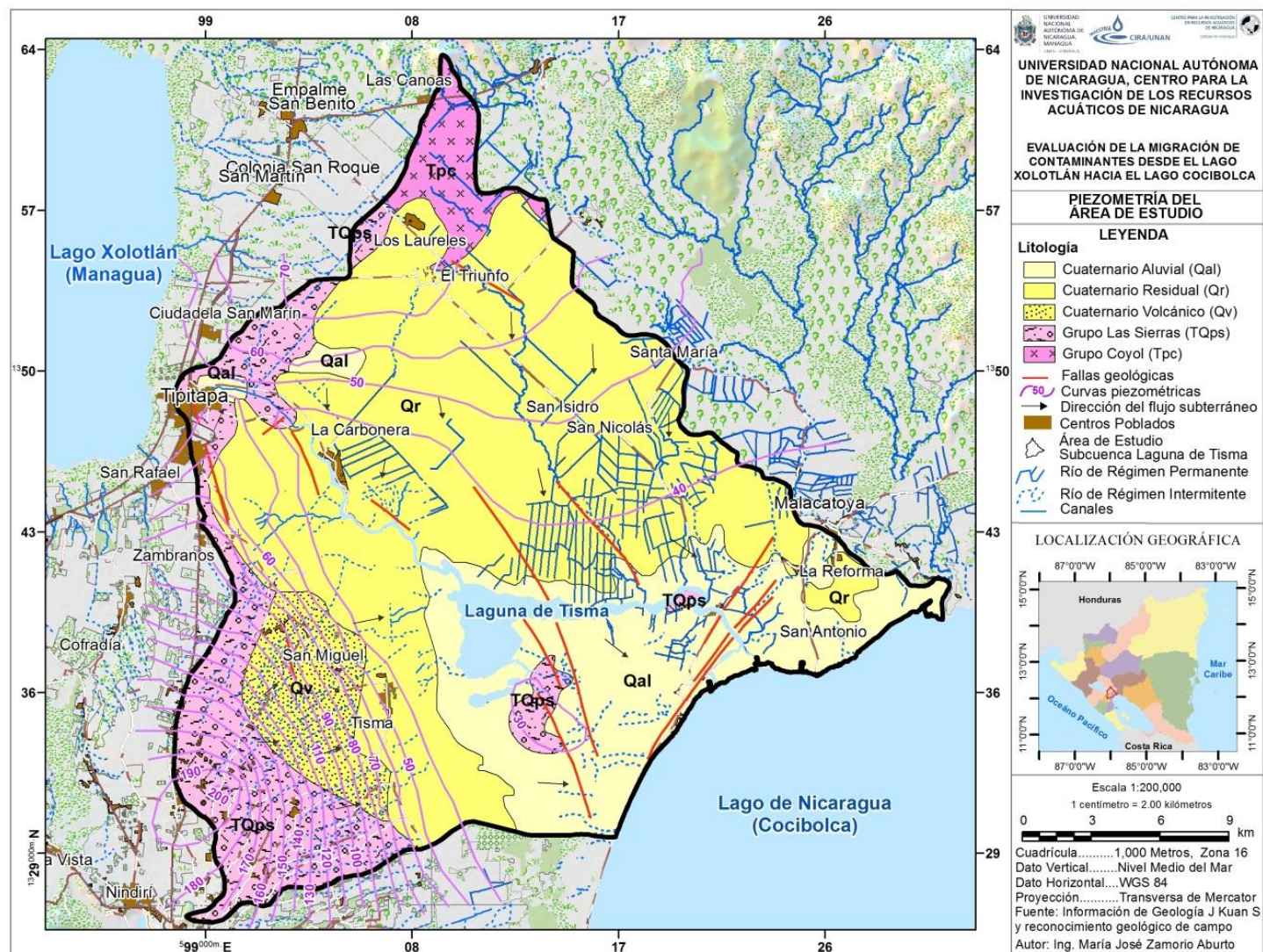


Figura 8. Piezometría de la subcuenca Tisma Rio Tipitapa.

VI.1.5.2 Características Hidrogeológicas.

Conductividad Hidráulica

Arriola (2012) definió conductividades hidráulicas en la zona de interlagos que van en intervalos desde los 10 a 40 m/d en las áreas comprendidas entre Nindirí y la zona media del Río Tipitapa. En las zonas de Tisma y Paso Panaloya cercanos al lago Cocibolca, definió valores entre los 100 a 220 m/d

Ineter (2010) estimó transmisividades en los acuíferos a partir de datos de pruebas de bombeo en pozos con profundidades mayores a 50 m. En la zona de estudio se observan tres grandes bloques de transmisividades que van desde 100 hasta valores mayores o iguales a 1000 m²/d, según la clasificación de Krásný, estas transmisividades se consideran como altas.

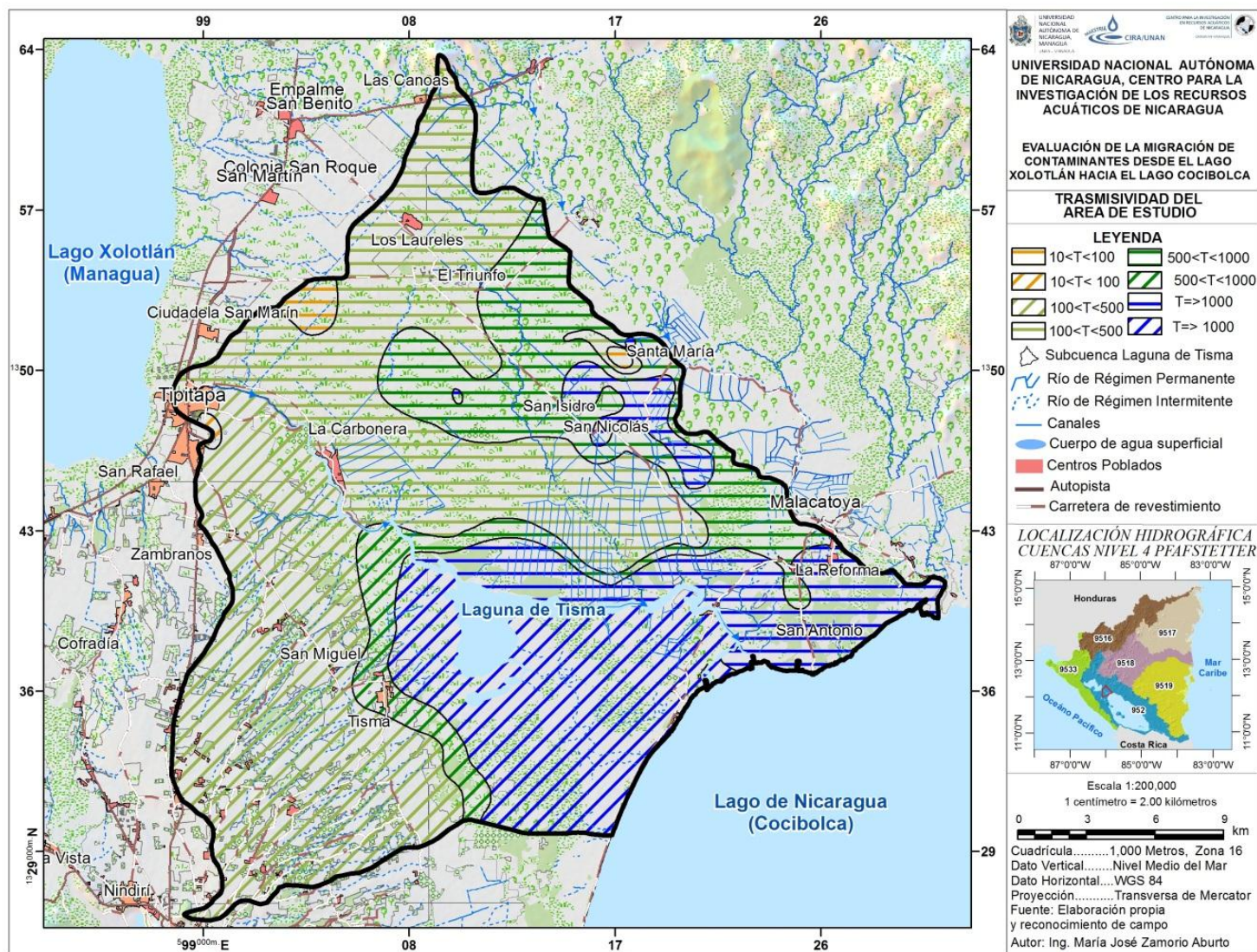


Figura 9. Mapa de Transmisividades Hidráulicas, tomado de INETER (2010).

VI.1.5.3 Hidrogeoquímica

La calidad del Lago Xolotlán difiere significativamente del lago Cocibolca. El lago Xolotlán presenta aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, conductividades mayores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, altas concentraciones de sólidos totales disueltos ($> 700 \text{ mgL}^{-1}$). En el Lago Xolotlán, se vierte aguas residuales domésticas e industriales, que ha alterado su calidad, lo cual a lo largo de los últimos cincuenta años ha incrementado la salinidad. Se han reportado concentraciones significativas de contaminantes de origen antropogénica como mercurio, fenoles y plaguicidas (Ineter, 1997). El Lago Cocibolca tiene valores de conductividad eléctrica menores de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y menor contenido de sólidos disueltos ($> 150 \text{ mgL}^{-1}$). La conexión subterránea puede ser analizada a través de las concentraciones de algunas sustancias en el área interlagos.

Referente a las aguas subterráneas, como se observa en la Figura 10, (INETER, 2010), en la zona del acuífero Las Sierras predominan aguas bicarbonatadas sódicas, referidas a aguas de descarga regional, con madurez hidrogeoquímica considerable.

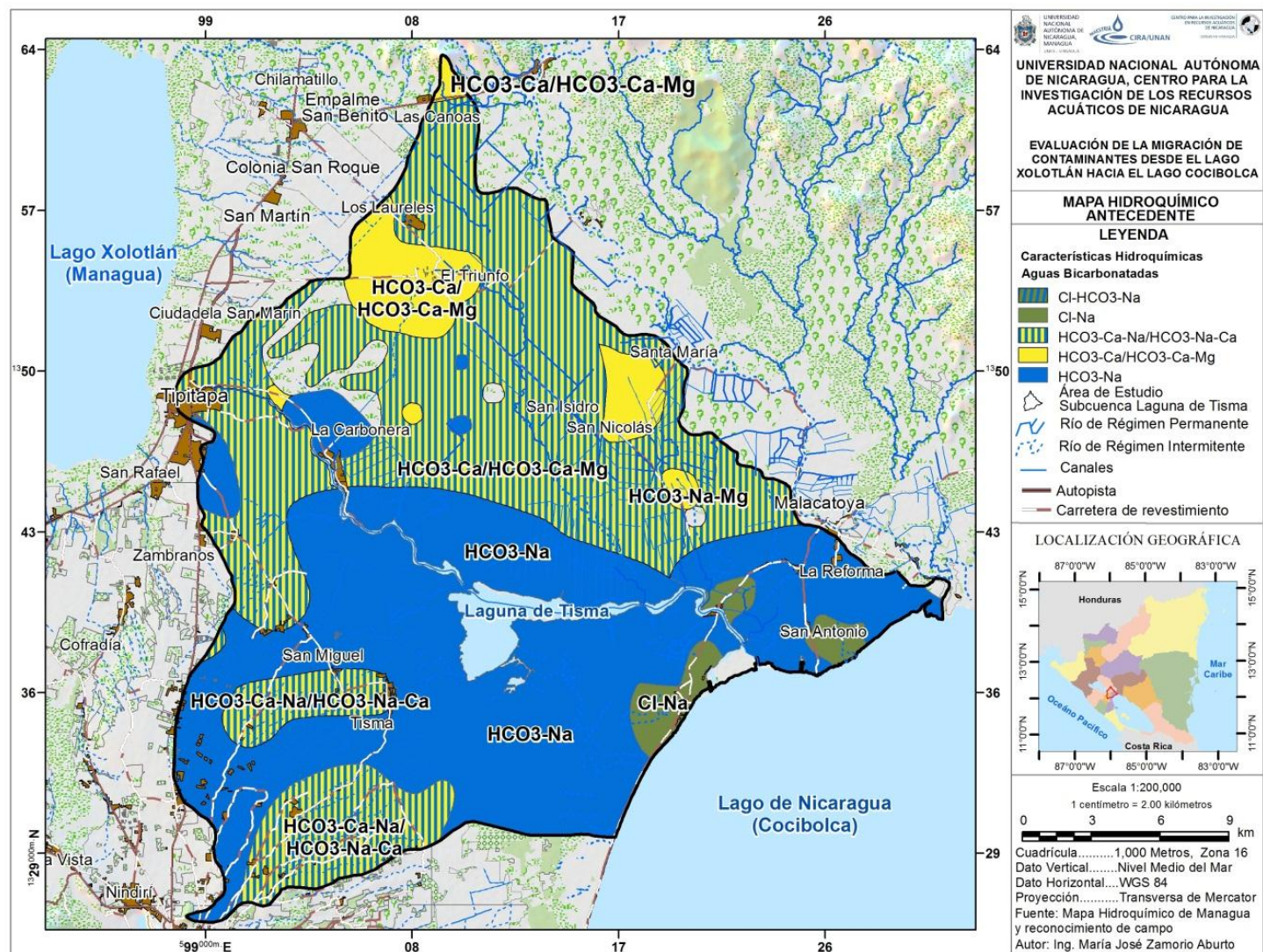


Figura 10. Mapa de Zonificación Hidroquímica, tomado de INETER (2010).

En el acuífero Tipitapa-Malacatoya predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas magnésicas, consideradas aguas de reciente infiltración y percolación, de poca madurez.

Otro aspecto importante que resalta de la zonificación hidrogeoquímica realizada por el INETER (2010) es la existencia de aguas cloruradas sódicas en el área de paso Panaloya y en las costas Oeste y Este del lago Cocibolca, cuyas características son anómalas considerando la evolución natural de los acuíferos Tipitapa – Malacatoya y Las Sierras. Esta anomalía probablemente ocurra por procesos de evaporación de las aguas.

VII. MARCO CONCEPTUAL

VII.1 Interacción entra las aguas subterráneas y las aguas superficiales.

Los ríos y lagos no son sistemas aislados de los medios subterráneos. Para estudiar la interacción agua superficial – agua subterránea, es fundamental conocer el tipo de conexión hidráulica entre los sistemas hidrológicos (Custodio, 2001; (Domenico & Schwartz, 1998) y Schwartz 1998; Weight y Sonderegger, 2000).

Los lagos y los ríos interactúan con las aguas subterráneas por tres formas:

Aporte de aguas subterráneas a aguas superficiales: para el caso de los ríos, esta conexión se denomina río efluente, río drenante o río ganador (Custodio, 2001, Winter et al 1998).

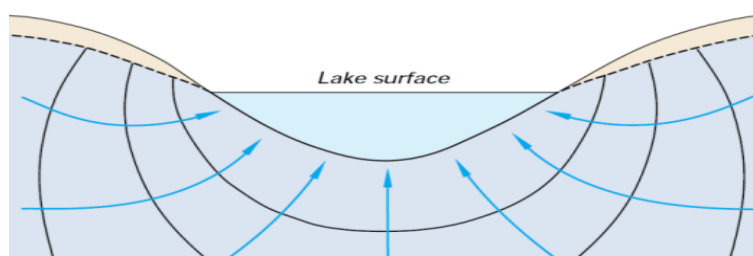


Figura 11. Modelo esquemático de aporte de las aguas superficiales a las aguas subterráneas. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource.

Aporte de aguas superficiales a aguas subterráneas: los lagos y los ríos recargan al acuífero, los ríos que alimentan a los acuíferos son ríos influentes o infiltrantes, que pierden por filtración parte de su caudal. Esto se debe a que el nivel del agua en el cauce del río es más alto que la superficie saturada de los materiales

permeables contiguos. Esta interacción les confiere la vulnerabilidad a las aguas subterráneas a la contaminación, en el caso que los lagos o los ríos estén contaminados.

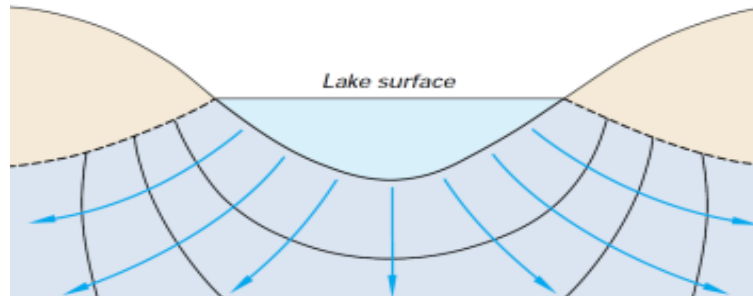


Figura 12. Relación entre aguas superficiales y subterráneas. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource

Los lagos y los ríos reciben el aporte de aguas subterráneas: pero a la vez alimentan al acuífero adyacente. Hay que considerar que un río puede variar a lo largo de su curso, según vaya cortando acuíferos con distintos controles estructurales o litoestatigráficos.

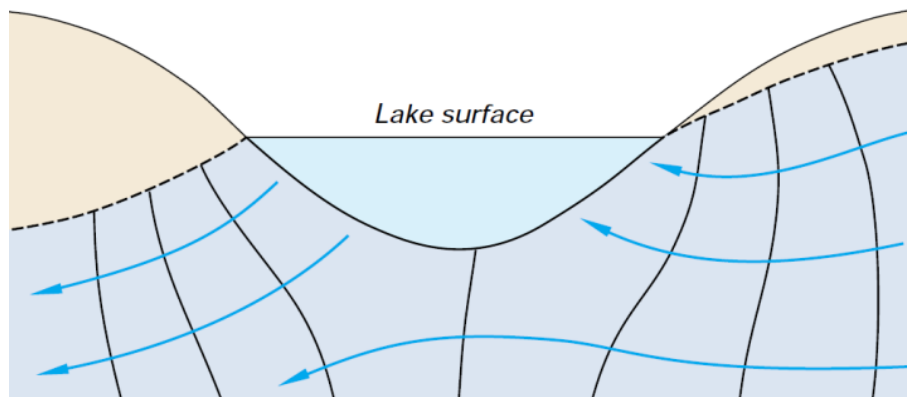


Figura 13. Relación entre de recarga y descarga entre un acuífero y lago. Tomado de: Groundwater and Surface Water a Single Resource

VII.2 Contaminación de los Recursos Hídricos

De las actividades antropogénicas, se derivan gran cantidad de desechos. La mayoría de éstos son descargados sobre aguas superficiales, como el caso del Lago Xolotlán, o dispuestos en el suelo, los que, por infiltración, llegan hasta las aguas subterráneas, causando contaminación. En la mayoría de los casos la

recuperación o restauración es sumamente difícil. La contaminación de las aguas provoca perturbaciones en el ciclo hidrológico, alterando la disponibilidad del agua en calidad y en cantidad.

Custodio (2001), considera la siguiente clasificación de sustancias contaminantes:

- Contaminantes minerales: Flúor, Boro, Cloruros.*
- Contaminantes metálicos pesados y de elementos menores: Arsénico, Mercurio, Plomo.*
- Contaminantes orgánicos degradables: Hidrocarburos, BTEX*
- Contaminantes poco o no degradables: Plaguicidas organoclorados.*

En esta tesis se realizó el análisis de los contaminantes minerales y contaminantes metálicos y de plaguicidas organoclorados y organofosforados. No se consideró los análisis de BTEX e Hidrocarburos, porque estos contaminantes provienen de fuentes puntuales como las estaciones de servicio y no fueron objeto de estudio en esta tesis.

VII.2.1 Orígenes de la Contaminación de Aguas Superficiales y Acuíferos

Los orígenes de la contaminación de acuíferos y aguas superficiales son muy variados y es difícil recogerlos en forma sintética, en los siguientes párrafos se abordan brevemente los más importantes:

Aporte de aguas superficiales contaminadas: se produce cuando estas recargan el acuífero, los contaminantes que contengan las aguas superficiales afectan directamente las aguas subterráneas. En general (salvo en casos de acuíferos muy fracturados) la parte en suspensión no contribuye a la contaminación, aunque produce un frenado en la recarga por la colmatación del lecho.

Contaminación por actividades domésticas: es una contaminación esencialmente orgánica y biológica originada por filtraciones de fosas sépticas, fugas de sistemas de alcantarillado sanitario, descarga de aguas residuales. Este tipo de contaminación altera el contenido de cloruros, sales disueltas, coliformes, carbono orgánico, dureza, entre otros.

Contaminación por labores agrícolas: el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas para aumentar la productividad y rendimiento en los cultivos origina la contaminación por carga orgánica, nitratos y fosfatos. Muchos de los plaguicidas utilizados tienen efectos adversos sobre la salud de los ecosistemas terrestres, acuáticos y sobre todo en la salud de las personas que están expuestas directa o indirectamente a ellos.

Los cultivos de ciertas plantas como las leguminosas, pueden aportar cantidades importantes de nitratos al terreno, que posteriormente pueden pasar a las aguas subterráneas. En condiciones normales el ión nitrato es reducido antes de alcanzar el nivel de saturación, se forma N_2 y NH_4 . El amonio es fijado por el terreno, sin embargo, si existe baja actividad biológica en el terreno, como medio reductor, el nitrato alcanza el nivel de saturación, provocando la contaminación del suelo y el acuífero.

Un segundo aspecto importante de la contaminación por las labores agrícolas lo constituyen los regadíos, sobre todo si el agua utilizada para riego se toma de un río contaminado, tal como lo hace la mayoría de productores de arroz, que están en la zona de Malacatoya.

Un tercer aspecto de la contaminación en zonas cultivadas es el derivado de la utilización de plaguicida (insecticidas, herbicidas, etc.) que pueden constituir un problema muy grave y permanente, en especial en lo referente a ciertos tipos como los grupos de plaguicidas organoclorados y organofosforados.

Contaminación por ganadería: es una contaminación esencialmente orgánica y biológica, con matices muy similares a la contaminación por actividades domésticas, pero con frecuencia más concentrada e intensa.

Contaminación natural: procesos naturales como el termalismo, la disolución de materiales geológicos, erupciones volcánicas u otros procesos originados por la naturaleza pueden alterar la calidad de las aguas.

VII.2.2. Mecanismos de contaminación de las aguas subterráneas

En el ambiente subsuperficial, el transporte de contaminantes es dependiente del movimiento de las aguas, es decir, el movimiento de los contaminantes se ve afectado por la distribución temporal y espacial de las aguas subterráneas y la recarga.

Las aguas subterráneas pueden sufrir una contaminación indirecta con dilución cuando esta se produce por contaminación de la recarga natural o por entrada de aguas contaminadas, provocada por las condiciones hidrodinámicas preexistentes, tales como las producidas por bombeo, drenajes, interacción con aguas superficiales contaminadas, etc.

Con el flujo del agua subterránea viajan las sustancias, las cuales pueden ser sorbidas, viajando a la misma velocidad que el agua. La contaminación a través de ríos contaminados, riego con aguas residuales, lixiviados, descarga de aguas residuales, etc., es muy fácil de comprender cuando se trata de acuíferos libres, el cual por su naturaleza no tienen materiales impermeables que los protejan.

Los acuíferos confinados están protegidos naturalmente contra la contaminación. Si en algunos lugares el acuífero es libre, puede producirse la contaminación. Otra condición para que un acuífero confinado se contamine, se produce cuando el potencial hidráulico es menor que el de acuíferos superpuestos. Por ejemplo, de un acuífero libre, el paso de agua contaminada puede realizarse a través del nivel confinante si este presenta baja permeabilidad (acuífero semiconfinado) o bien a través de pozos mal contruidos o en pozos en los que la rejilla este ubicada en ambas formaciones. En caso contrario que el acuífero confinado tenga mayor carga hidráulica que el contaminado, no puede producirse la filtración de las aguas contaminadas.

En los acuíferos permeables por fracturas y fallas, el agua contaminada entra a través del material fracturado, ya sea directamente o a través de otras formaciones permeables. El agua contaminada se mueve de acuerdo a la dirección de gradiente hidráulico. La anisotropía, la cual genera valores significativamente diferentes de permeabilidad horizontal y vertical, influye significativamente en el movimiento de agua contaminada y de los contaminantes, generando a nivel local flujos preferenciales que no corresponden a las características a nivel regional.

VII.3 .Técnicas Isotópicas

Los isótopos ambientales se han convertido en un componente rutinario en los estudios de la hidrogeología, geoquímica e hidrogeología física y estudios de contaminación de las aguas subterráneas. Esta técnica provee información de la procedencia, edad y calidad de las aguas, evolución geoquímica, procesos de recarga, interacción entre los materiales geológicos, origen de la salinidad y procesos de contaminación (Clark Ian and Aravena Ramon, 2005).

Entre los isótopos más empleados en los estudios hidrológicos resaltan el Deuterio (^2H) y Oxígeno 18 (^{18}O), isótopos estables que constituyen una herramienta poderosa para determinar zonas de recarga de aguas subterráneas y su interacción con aguas superficiales.

Los procesos meteorológicos (evaporación, condensación, precipitación) de una región en particular modifica la composición de los isótopos estables ^2H y ^{18}O en el

agua, originando aguas de recarga con características isotópicas particulares. Una vez recargada, el agua no cambia su composición isotópica, por lo que estos sirven como trazador natural para determinar la procedencia de las aguas subterráneas.

VII.3.1 Medición y concentración de isótopos

La abundancia o relación isotópica se define como la proporción entre el isótopo en defecto (menos abundante) y el isótopo en exceso (más abundante) y se representa por la siguiente expresión:

$$R = \frac{\textit{Abundancia del isótopo en defecto}}{\textit{abundancia del isótopo en exceso}}$$

Moon (2001) señala que la abundancia isotópica no puede expresarse como número absolutos por diferentes razones, entre ellas destacan:

- El tipo de espectrómetros de masa adecuados para medir las pequeñas variaciones naturales de las abundancias isotópicas con gran sensibilidad, no son adecuados para obtener cocientes absolutos aceptables.
- Para que sea posible una comparación internacional se requieren materiales de referencia para relacionar las muestras.
- El uso de las relaciones isotópicas conllevaría a expresar los resultados mediante números formados por una enorme cantidad de dígitos (5 ó 6).
- En principio los cocientes absolutos son menos relevantes que los cambios que ocurren en las relaciones durante las transiciones entre fases o moléculas.

Por ello, la abundancia isotópica se describe normalmente como un desplazamiento de la relación isotópica de una muestra cualquiera relativo a una muestra de referencia (patrón o estándar). El resultado se expresa en tanto por mil:

$$^2\delta = \frac{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{muestra}} - (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{patrón}}}{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{patrón}}}$$

$$^{18}\delta = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{patrón}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{patrón}}}$$

VII.3.2. Fraccionamiento isotópico

Existen pequeñas diferencias en el comportamiento tanto químico como físico de los compuestos isotópicos, ocasionado por un fenómeno denominado “fraccionamiento isotópico”.

El fraccionamiento isotópico se define como el fenómeno a través del cual la composición isotópica de un elemento cambia por medio de la transición de un estado físico o de una composición química a otra.

Se distinguen tres procesos de fraccionamiento isotópico dependientes de la masa, que son: el termodinámico (en los sistemas de equilibrio físico o químico), el cinético (en las reacciones (bio) químicas de una única dirección o irreversibles) y el fraccionamiento de transporte durante los procesos difusivos.

La variabilidad en la composición isotópica del ciclo hidrológico se debe a la dependencia del fraccionamiento isotópico con la masa, junto con las transiciones de fase y los procesos de transporte del ciclo.

El fraccionamiento es el responsable de los cambios de la composición isotópica del agua en el paso de una fase a otra. Durante el proceso de condensación (proceso al equilibrio), que da lugar a la producción de las lluvias, la fracción de vapor que permanece en el aire se empobrece progresivamente en ^{18}O y ^2H . Por ello los valores de estos isótopos en vapor de agua se hacen progresivamente más negativos a medida que se producen las precipitaciones (proceso de vacío o efecto de continentalidad). En la figura 14 se ilustra esta situación.

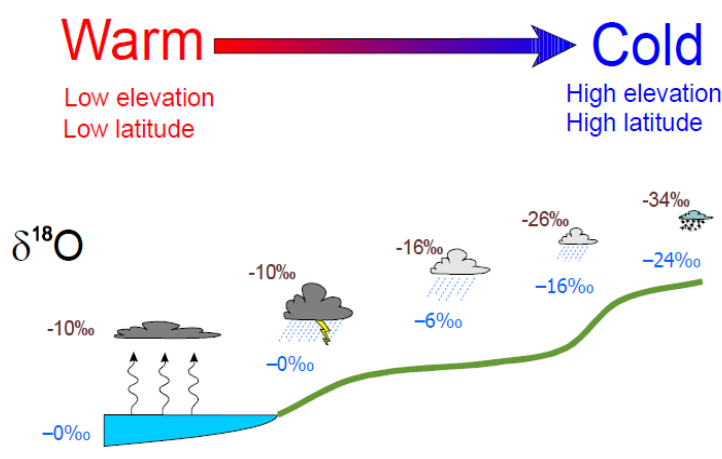


Figura 14. Evolución del contenido de ^{18}O en el vapor de agua y precipitación durante la evaporación. Tomado de Clark y Aravena (1997)

La causa principal de esta diferencia en el comportamiento de las moléculas, está relacionada con la masa. Las moléculas isotópicamente más pesadas poseen menor movilidad y mayor energía de asociación en los enlaces.

El fraccionamiento isotópico en el ciclo hidrológico es afectado por los siguientes factores:

-Latitud, a medida que aumenta la latitud (nos alejamos del Ecuador), se producen precipitaciones con valores de δ (desviación isotópica) para el ^2H y ^{18}O cada vez más negativos.

-El efecto continental, a medida que la masa de nubes ingresa al continente y se produce la lluvia, las moléculas más pesadas tendrán preferencia al momento de formar parte de la fase de condensación, por lo tanto, las lluvias producidas presentan valores de δ de Deuterio y ^{18}O cada vez más empobrecidos.

-Altitud, a medida que aumenta la altitud y se producen las precipitaciones, los valores de δ del ^2H y ^{18}O van disminuyendo. Esta relación es muy útil en hidrogeología, pues permite identificar la elevación a la que se produce la recarga.

VII.3.3. Relación entre las variaciones del ^2H y el ^{18}O en el agua

Las cantidades de $\delta^{18}\text{O}$ y ^2H de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada línea meteórica mundial, determinada por Craig (1961) y Dansgaard (1964) cuya ecuación expresada en tantos por mil es:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Posteriormente Rozanski et al. (1993), introdujo mejoras en la ecuación anterior, obteniendo la expresión:

$$\delta^2\text{H} = 8.17 (\pm 0.007) \delta^{18}\text{O} + 11.2 (\pm 0.65)$$

Gráficamente esta ecuación representa la curva que se conoce con el nombre de Línea Meteórica Mundial. Figura 15.

(MWL): $\delta D \approx 8\delta^{18}O + 10$

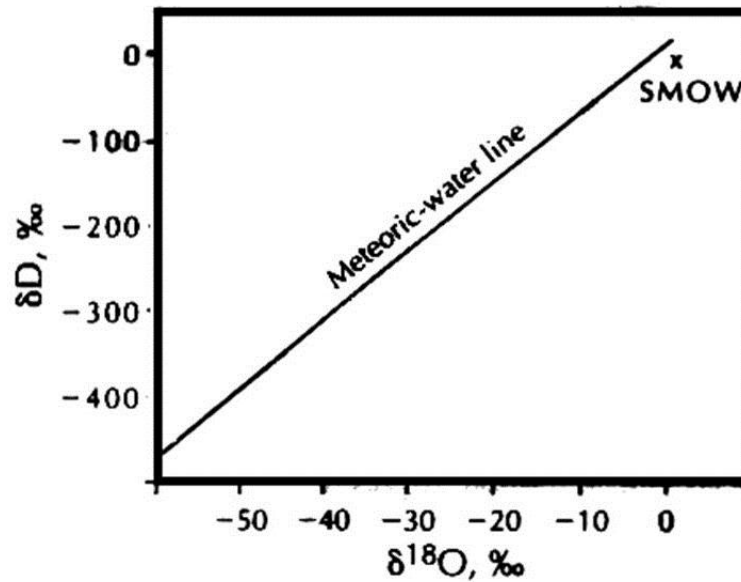


Figura 15. Línea Meteórica Mundial del Agua.

Localmente pueden existir ligeras variaciones que se investigan a partir del análisis del agua de lluvia no evaporada colectada durante un tiempo determinado, donde a partir del contenido isotópico de ^2H y ^{18}O se construye la que se denomina línea meteórica local.

En el gráfico de la línea meteórica local se agregan los resultados isotópicos de las muestras de agua subterránea para comparar la concentración isotópica de la precipitación y el acuífero. Esto permite delimitar la zona de recarga, así como determinar si las aguas subterráneas provienen de la lluvia local, de precipitaciones infiltradas en la parte alta de las montañas, de un río, un lago o combinaciones de las mismas.

VII.4 Hidroquímica de las Agua Subterráneas

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima y luego descarga en ríos, manantiales, lagos o extraída por pozos, pueden transcurrir unos días o miles de años, y el recorrido puede ser de unos metros o varios kilómetros. La composición química del agua cambiará debido a este recorrido, este proceso se denomina evolución geoquímica y depende de las características de los materiales geológicos por los cuales el agua circula, tiempo de contacto, velocidad del flujo, entre otras características.

Las reacciones y los procesos químicos que se desarrollan son muy variados. Como norma general, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia con los medios hidrogeológicos, son generalmente bicarbonatadas, posteriormente predomina el sulfato, y las aguas con mayor recorrido y mayor concentración de sales, son cloruradas. Esta evolución se denomina *Secuencia de Chevotareb*. Figura 16.

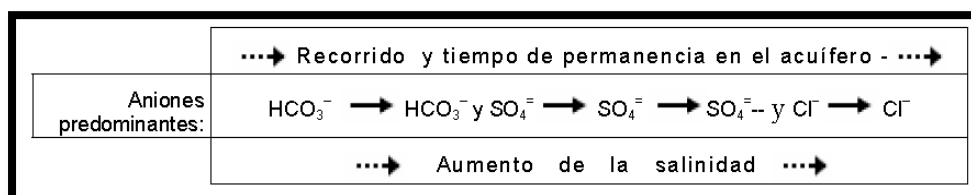


Figura 16. Evolución iónica en las aguas subterráneas

En la composición catiónica la secuencia análoga será: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++} . Esta secuencia será condicionada por solubilidad del material geológico y la abundancia de las sales.

La secuencia de Chevotareb establece un proceso lineal, que no toma en cuenta la anisotropía del medio hidrogeológico, por ello, Domenico (1972) citado por Freeze y Cherry, (1979) describe la distribución geoquímica de las aguas subterráneas para una región, distinguiendo tres zonas de profundidad:

-Una zona superior, con flujo activo, generalmente con recorrido corto y tiempo de recorrido de años o decenas de años, las aguas se caracterizan por ser del tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica y poco salina.

-Una zona intermedia, con flujo menos activo, recorridos más largos y tiempo de recorrido y permanencia de cientos o miles de años. Estas aguas son más salinas y el anión predominante será el sulfato.

-Una zona inferior, con flujo muy lento, con largo recorrido y tiempos de permanencia a miles a millones de años, la salinidad es elevada y las aguas son de tipo cloruradas. Sin embargo, en terrenos ígneos, las actividades tectónicas, pueden conferir cambios drásticos de salinidad de las aguas subterráneas, sin que esta permanezca por tiempos extensos. Esto explica porque en una misma área pueden extraerse aguas de composición muy distintas, aunque la litología sea relativamente homogénea.

VIII. DISEÑO METODOLÓGICO

Existen diferentes técnicas para determinar las interacciones entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales. Los principales objetivos de esta tesis es evaluar la dinámica hidrológica en la zona interlagos para determinar la migración de sustancias desde el Lago Xolotlán hacia el Cocibolca a través del medio hidrogeológico, utilizando técnicas hidroquímicas, isotópicas e instalación de piezómetros y mini piezómetros. Las etapas y las técnicas empleadas en la investigación se describen en los siguientes párrafos.

VIII.1. Etapa 1: Revisión Bibliográfica

En la etapa de gabinete se realizó la recopilación y análisis de información previa disponible a escala regional, semiregional y a detalle incluyendo mapas e imágenes de la geología, hidrología, hidrogeología e informes de estudios de calidad de agua de los lagos Xolotlán, Cocibolca y de los acuíferos del área. Esta información fue utilizada para entender el contexto del medio hidrogeológico, valorar de acuerdo a la información antecedente y de las características naturales, las técnicas y métodos a ser empleados en la investigación, así como para definir los puntos de muestreo.

VIII.2. Etapa 2: Investigación de campo.

VIII.2.1.1 Reconocimiento del área de estudio

Para reconocer y valorar el estado de las rutas de acceso, rasgos físicos, geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y socioeconómicos al área estudiada se realizaron cuatro giras de campo, iniciando en agosto de 2011 y finalizando en octubre 2011. Las actividades realizadas en este reconocimiento fueron:



Foto 1. Medición de Parámetros en pozo.

-Recorrido del área comprendida desde el nacimiento del Río Tipitapa en el Lago Xolotlán hasta la desembocadura en el Lago Cocibolca, ininterrumpidamente, pasando por la Laguna y humedales de Tisma, recorriendo 124 km. Las actividades realizadas dentro de este reconocimiento incluyeron la medición de niveles de agua en 40 objetos hidrogeológicos y de los siguientes parámetros físicos químicos: pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox y oxígeno disuelto, utilizando el equipo marca Orión.

-Durante el reconocimiento se analizó el ambiente geológico del área y se definió la ubicación de los piezómetros y mini piezómetros en las riberas del Río y las costas de los lagos para la toma de muestras de agua y realización de análisis.

VIII.2.2 Técnicas empleadas en la etapa de campo

VIII.2.2.1. Piezómetros y Mini piezómetros.

El estudio isotópico elaborado por INETER en el año 1997 sugiere la existencia de flujo subterránea del Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca en el sector Sur del lago Xolotlán. Para interceptar las líneas de flujo de recarga y descarga se construyeron e instalaron diez mini piezómetros y cuatro piezómetros multiniveles. Dada la naturaleza geológica alrededor de los lagos se utilizaron diferentes estrategias y herramientas para la construcción de los piezómetros.

A continuación, se describe el proceso de la instalación.

-Instalación de Mini piezómetros

Los mini piezómetros (MP), son pequeños pozos de observación ubicados en las zonas de descarga de las aguas subterráneas. Son utilizados para medir niveles y coleccionar muestras de agua. La profundidad de los MP instalados oscila entre uno a cinco metros. Los piezómetros son tubos instalados en los pozos de explotación o en su defecto los pozos en sí, cuando no se ha instalado el piezómetro. Los MP se instalaron a la orilla del cauce del río Tipitapa y en las costas SW y SE del lago Cocibolca. Estos interceptaron las líneas de flujo de descarga hacia el Río y hacia el lago Cocibolca.



Foto 2. Tubería galvanizada de $\frac{1}{2}$ "para la instalación de mini piezómetros en costa del Lago Cocibolca, apreciado en la fotografía.

Criterios de ubicación: Los MP se ubicaron en aquellos puntos donde se observó cambios de facies y de estructuras a lo largo del Río (cambios en la curvatura del Río, levantamientos morfo tectónicos, contactos litológicos, etc.). Estos cambios en la morfología del Río pueden ser zonas preferenciales de flujo, ascenso de aguas juveniles o servir de barrera geológica en el medio. En las costas del Lago Cocibolca, fueron instalados con la finalidad de interceptar el flujo de descarga de aguas subterráneas hacia el Lago.

Construcción: El tipo de material y la litología varía. En el sector del cauce del Río Tipitapa afloran material rocoso (Tobas de la Formación Las Sierras). Predominan suelos residuales de espesor variable (0.5-1.0m). En las costas NW y SW del Lago Cocibolca prevalecen arenas sueltas. Estas heterogeneidades del terreno

requieren emplear diferentes técnicas para la construcción de los MP, a continuación, se detalla el procedimiento realizado:

-Río Tipitapa: Para la instalación de los MP a orillas del cauce del río Tipitapa se excavó un hueco de aproximadamente 0.3 m de diámetro. Se alcanzó una profundidad promedio de 30 cm por debajo del nivel freático. El ademe consistió en tubería ranurada de PVC de 2 pulgadas. La rejilla fue definida en base al nivel del agua. Para evitar la intrusión de material fino como limo y arcilla que pudiese obstruir el flujo de agua, se utilizó poliéster, como medio filtrante en la zona de las rejillas.

-Lago Cocibolca: En las costas del Lago, el material utilizado para los MP fue tubería de hierro galvanizado de ½ pulgada. Debido al material arenoso, se logró alcanzar profundidades entre 4.1 y 4.5 metros, martillando la tubería galvanizada. Las rejillas tienen una longitud de 15 cm del nivel freático hacia la superficie.



Foto 3. Instalación mini piezómetros en costas del Lago Cocibolca. Se muestra la construcción de las rejillas y la instalación en los sedimentos.

En total se instalaron 11 mini piezómetros, siete de ellos a lo largo del trayecto del Río Tipitapa y el resto en las costas del Cocibolca, en específico en las inmediaciones de las Haciendas El Hatillo, comarca El Guayabo, Hacienda San Pedro y cerca de la desembocadura del Río Malacatoya al Lago Cocibolca. Tabla 2, Figura 17.

Tabla 2. Ubicación y especificaciones de MP instalados manualmente.

No	Coordenadas		Ubicación	Tipo	Profundidad	Rejilla cm
	X	Y				
1	605065	1343292	Hcda Hato Grande /Río Tipitapa	PVC		30
2	603326	1347438	Hcda. El Quemado/Río Tipitapa	PVC	0,91	20
3			Hcda. El Hatillo - Lago Cocibolca	HG	4,1	15
4	618182	1332514	Hcda. Santa Elisa – Malacatoya/Lago Cocibolca	HG	4,18	16
5	625660	1336776	Hcda. San Pedro/Lago Cocibolca	HG	3,54	18
6	607998	1341534	Hcda. El Cascajal/Río Tipitapa	PVC	1,4	80
7	607223	1343594	Estero El Caballo/Río Tipitapa	PVC	2	60
8	608190	1341610	Enfrente Hcda. El Cascajal/Río Tipitapa	PVC	1,5	80
9	620327	1339582	Paso Panaloya/Laguna de Tisma	PVC	1,65	50
10	606584	1342720	Después Hcda. Hato Grande/Río Tipitapa	PVC	1,42	30
11			Casa Yadira Rocha – Lago Cocibolca	HG	4,5	16

*HG: Hierro Galvanizado, diámetro 0.5 pulgadas.

* PVC: Tubería PVC, diámetro 2 pulgadas

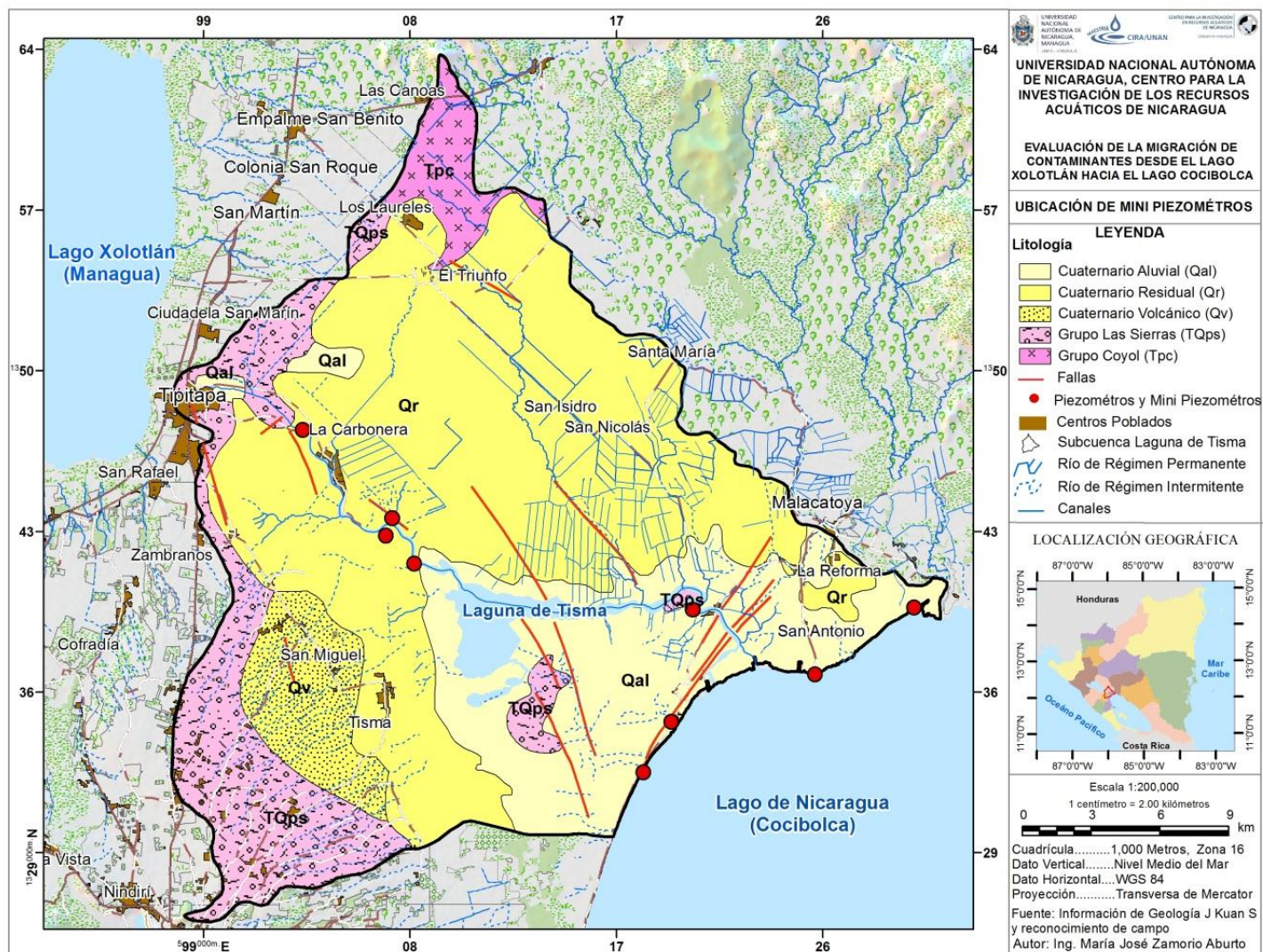


Figura 17. Ubicación de Mini piezómetros.

- Desarrollo y limpieza de MP:

Finalizada la instalación de los 11 MP, se procedió a la limpieza y desarrollo de los mismos, con una bomba peristáltica de capacidad de trabajo 5 l/s. Se extrajo todo el material fino como limos y arcillas. Luego se procedió a la medición de parámetros de campo: pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y sólidos totales disueltos.

Los criterios tomados en cuenta para determinar que el MP estaba captando agua fresca de la formación acuífera, fueron: la estabilidad de los parámetros sólidos totales disueltos, turbidez, pH, conductividad eléctrica y temperatura, medidos en campo durante el desarrollo de los MP.



Foto 4. Limpieza y desarrollo de los Mini piezómetros instalados en las costas del lago Cocibolca

-Construcción e Instalación de Piezómetros

En el Lago Xolotlán, se instalaron cuatro piezómetros a dos niveles diferentes de profundidad (5 y 30 m), a fin de medir el gradiente vertical y deducir la relación descarga/recarga del Lago y los acuíferos adyacentes. Se tomaron muestras a nivel subsuperficial y de flujo profundo. Esta información sirvió para determinar el patrón que rige el comportamiento hidrodinámico del Lago de Xolotlán en el medio superficial, subsuperficial y subterráneo, así como la conexión de flujo entre el lago Xolotlán y el lago Cocibolca.

El basamento geológico del lago Xolotlán lo constituye las tobas de la Formación Las Sierras. Para poder construir e instalar los Piezómetros fue necesario utilizar el equipo mecanizado de perforación del Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO), figura 5. Los métodos de perforación utilizados son:

- Ensayo de Penetración Normal (Standard Penetration Test - SPT) utilizado en los primeros metros de perforación.

- Método rotativo con tricónica, para perforar la toba que constituye el basamento geológico. Ambos métodos son basados en las normas ASTM (American Society for Testing Material).



Foto 5. Equipo de perforación para construcción de Piezómetros en cauce del Río Tipitapa.

Se utilizó Tubería de PVC de 2 pulgadas, cédula 17 para el ademe. El desarrollo y purgado de los piezómetros fue realizada manualmente, con el empleo de un bayler de 1L.



Foto 6. Extracción de material de perforación e instalación de tubería de PVC durante el proceso de construcción e instalación de los Piezómetros.

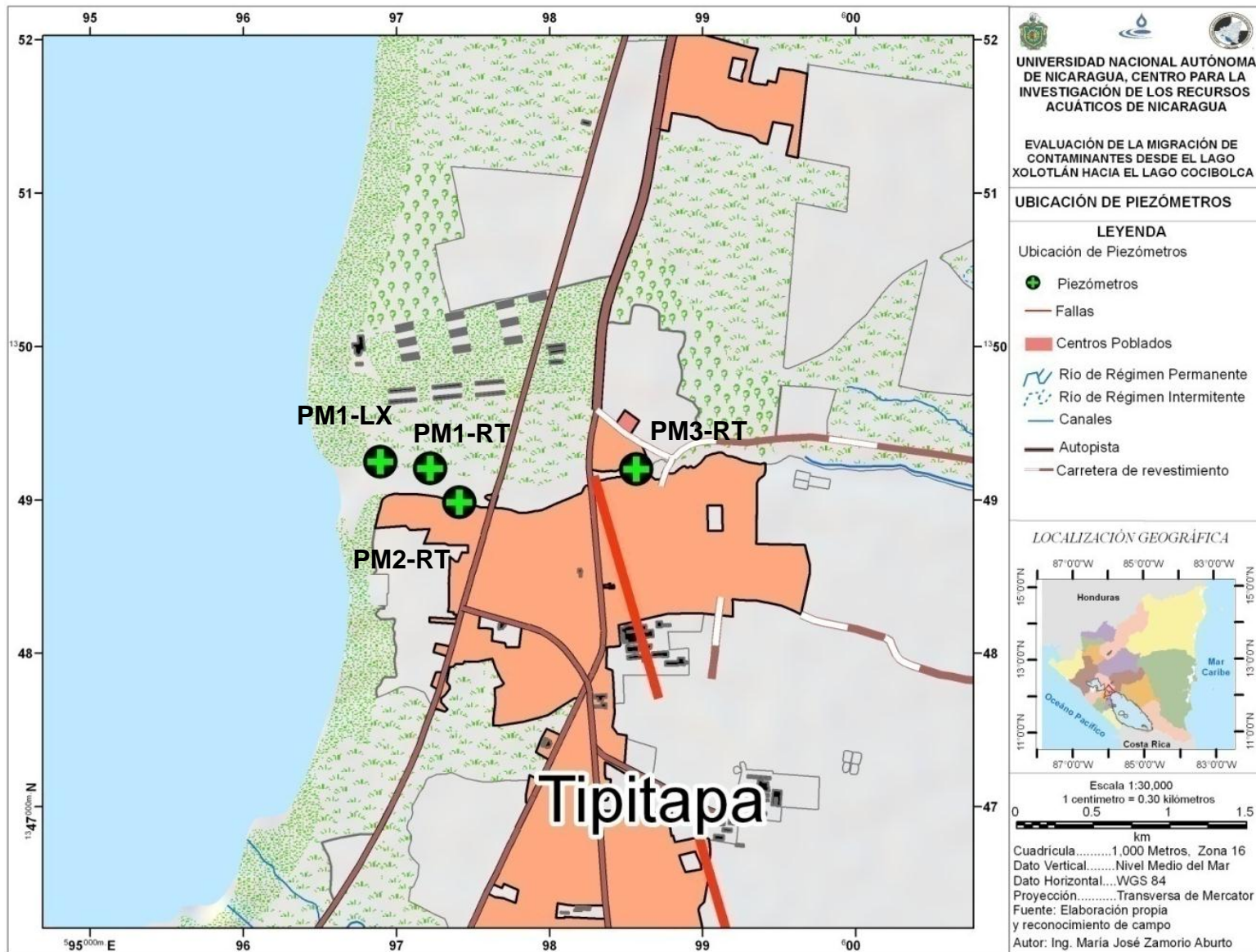


Figura 18. Ubicación de piezómetros en costas del Lago Xolotlán

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas de la ubicación de los piezómetros, la profundidad de alcance y la longitud de la rejilla. En la figura 18 se muestra su localización.

Tabla 3. Ubicación de Piezómetros

Ubicación de Piezómetros				
Piezómetro	Coordenadas		Profundidad de Piezómetro (m)	Longitud de rejilla (m)
	Norte	Este		
PM1-LXA	1349255	596913	33.5	5
PM1-LXB1			4.4	1
PM1-RTA	1349210	597233	32.5	5
PM1-RTB			3.5	1
PM2-RTA	1348996	597401	38.84	5
PM2-RTB			3.9	1
PM3-RTA	1349202	598563	21	6

-Cálculo del Gradiente Hidráulico

Finalizada la instalación de los piezómetros, se procedió a calcular el gradiente hidráulico vertical. El gradiente hidráulico determina en qué dirección se mueve el agua, hacia o desde el acuífero y se define como la diferencia entre las cargas hidráulicas de dos piezómetros divididos por la distancia vertical entre las profundidades de los piezómetros. Para calcular el gradiente hidráulico vertical se empleó la siguiente ecuación, cuya variable es componente de la Ley general de Darcy:

$$i_{AB} = \frac{h_B - h_A}{L}$$

Donde:

h: Carga hidráulica (m)

L: Longitud de rejilla (m)

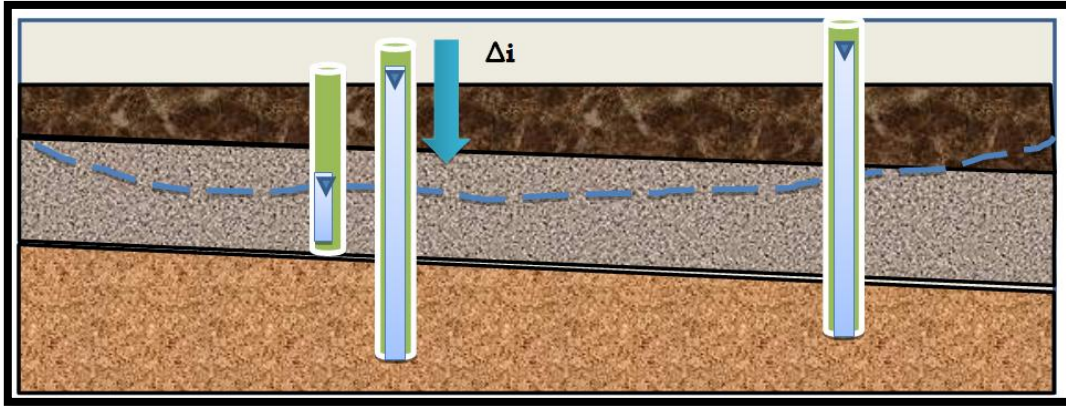


Figura 19. Esquema del gradiente hidráulico de los piezómetros.

-Medición de parámetros físico químicos en piezómetros

Finalizada la construcción e instalación de los piezómetros se realizó la medición en la columna de agua de la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica. Estas mediciones se realizaron con la finalidad de determinar la posible influencia de las aguas contaminadas del Xolotlán hacia los acuíferos adyacentes

VIII.3. Etapa 3: Muestreo y Análisis de Laboratorio

Se realizó el muestreo de agua para el análisis físico químico, metales pesados, isótopos y plaguicidas, durante la época de verano. Los puntos a muestrear incluyeron: los lagos Xolotlán y Cocibolca, el río Tipitapa, laguna de Tisma, pozos perforados, pozos excavados, piezómetros y mini piezómetros. El procedimiento para el muestreo y la ubicación de los sitios de análisis se presentan en los siguientes apartados.

Foto 7. Toma de Muestras para Análisis en Laboratorio.



-Físico química

Para analizar la calidad del agua y determinar su naturaleza hidroquímica se realizó el análisis de 35 muestras, los parámetros a analizar se enlistan en la Tabla 13. Se analizaron las concentraciones de los iones mayoritarios. Los resultados fueron utilizados para determinar el tipo hidroquímico. La diferencia entre las concentraciones de los distintos sitios de muestreos los procesos definen el origen del agua y pueden indicar si el Lago Xolotlán tiene influencia sobre las aguas subterráneas de la zona interlagos, el Río Tipitapa, la Laguna de Tisma y el Lago Cocibolca.

Tabla 4. Parámetros analizados y método de medición.

Análisis	Método	Unidades	Límite de detección
Alcalinidad total	2320.B 1	mg.l-1	1,67
Alcalinidad a la Fenolftaleína	2320B 1	mg.l-1	0.75
Bicarbonatos	4500B 1	mg.l-1	0.02
Boro	3500-ca.D 1	mg.l-1	0.08
Calcio	Colorimétrico de EDTA)2320B 1	mg.l-1	2.00
Carbonatos	2120B 1	mg.l-1 Pt-Co	
Color verdadero	4110 1	mg.l-1	0.250
Cloruros	Rodier34 Cromatografía Iónica	mg.l-1	0,010
Conductividad	4500 CO2-C1	mg.l-1	
Dureza Cálcica	2340.C 1	mg.l-1	0.13
Dureza total	4500-F.D 1	mg.l-1	0.030
Fluoruros	4500. PE 1	mg.l-1	0.005
Hierro total	3500Mg.E 1(método por fenoritolina)	mg.l-1	0.20
Magnesio	4500-NO3-. B 1(método por cálculo)	mg.l-1	0,05
Nitratos	por Cromatografía Iónica		
Nitritos	Azul de Indofenol 33	mg.l-1	0.005
Nitrógeno Amoniacal (Amonio)	Segunda Derivada 5	mg.l-1	0.100
pH	3500K.D 1	mg.l-1	0.10
Potasio	Fotometría de llama4500-Si.D 1	mg.l-1	0.2
Sílice disuelta	3500-Na.D 1	mg.l-1	0.18
Sodio)	4500-SO4-.E 1(Método Electrodo de ION Selectivo	mg.l-1	0,25
Sulfatos por Cromatografía Iónica		mg.l-1	
Turbidez	2130.B 1	UNT	1.0 a 100

-Metales y metaloides

Se realizó el muestreo para análisis de Cadmio, Zinc Aluminio y Arsénico, en 22 muestras de agua, ocho en los piezómetros y mini piezómetros, dos en los lagos, seis en pozos perforados, una en un pozo excavado, una en la laguna de Tisma y una en el Río Tipitapa. El 36 % de las muestras tomadas proviene de pozos utilizados para la ingesta de agua o para el abastecimiento como agua potable.

Estos metales fueron analizados porque están presentes en las aguas del lago Xolotlán, por lo cual es necesario estudiar su presencia en las zonas interlagos y definir su proveniencia además su presencia en el agua puede ocasionar daños a la salud de las personas y a los ecosistemas acuáticos.

Las muestras tomadas fueron acidificadas con HNO_3 0,2N en campo para prevenir cualquier cambio en las concentraciones de los metales debido a procesos de precipitación o sorción durante el almacenamiento y transporte de las mismas hacia el laboratorio.



Foto 8. Acidificación de muestras provenientes de los piezómetros para análisis de metales. Al fondo se aprecia el espejo de agua del Lago Xolotlán.

Las concentraciones de metales pesados en las muestras de aguas subterráneas y superficiales fueron medidas en el Centro de Investigaciones de Recursos Acuáticos, utilizando un Espectrofotómetro de Masa (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer (ICP/MS)).

El análisis de As en agua se realizó en el laboratorio de contaminantes metálicos del laboratorio del CIRA/UNAN. El instrumental de análisis utilizado fue un Espectrómetro de Absorción Atómica VARIAN SpectrAA-240FS con generador de hidruro VGA-77.

-Plaguicidas

Un estudio de línea base realizado por ENACAL en el año 2007, descartó la presencia de plaguicidas en las aguas del Lago Xolotlán, por ello, el objetivo de realizar estos análisis en los puntos seleccionados fue para determinar si las actividades antropogénicas desarrolladas en la cuenca de los interlagos pueden afectar la calidad de agua del Río Tipitapa, que luego se conecta con la Laguna de Tisma y el Lago Cocibolca.

Los plaguicidas fueron muestreados tanto en agua como en sedimento. Algunos grupos son pocos solubles en agua y su presencia en los sedimentos es un riesgo, ya que eventualmente, por cambios en turbulencia y de las condiciones físico-químicas pueden migrar a la columna de agua y estar biodisponibles. Los procedimientos empleados son:

Muestreo en agua: Se tomó cuatro muestras para realizar el análisis de plaguicidas organoclorados, organofosforados y triazinas. Dos muestras en pozos perforados y dos muestras en el Río Tipitapa y la Laguna de Tisma. Para el análisis de los plaguicidas se tomó 5 litros de agua y se preservó con 20 ml de hexano e inmediatamente preservadas en un termo con hielo hasta su entrega en el laboratorio, los puntos muestreados fueron:

Tabla 5. Sitios de Muestreo de Agua

Muestreo de agua			
Punto de muestreo	Coordenadas		Ubicación
	Norte	Este	
Estero El Caballo	1343542	607240	Río Tipitapa
Laguna de Tisma	1339926	610943	Laguna Tisma
PP Pasquier	1347618	603794	El Hatillo, Granada.
PP - Sistema de Agua	1332832	618133	San Juan de La Pywood, Tipitapa.

Muestreo en sedimento: El grupo de plaguicidas analizados, por su naturaleza química son afines a la materia orgánica presente en los sedimentos, por ello también se consideró el análisis de la matriz sedimentos. Se tomaron cuatro muestras con draga *Van Been* de acero inoxidable. El muestreo se realizó siguiendo el procedimiento de captación de la muestra desarrollado por el CIRA-UNAN. Los puntos muestreados en sedimentos se detallan en la Tabla 6. Es importante destacar que en estos sitios también se tomó muestras de agua para el análisis de los plaguicidas.

Tabla 6. Sitios de Muestreo en Sedimento

Muestreo de sedimentos.			
Punto de muestreo	Coordenadas		Ubicación
	Norte	Este	
Estero El Caballo	1343542	607240	Río Tipitapa
Laguna de Tisma	1339926	610943	Laguna Tisma

La metodología para la determinación de plaguicidas organoclorados y organofosforados en agua se fundamenta en la extracción líquido-líquido. Se utiliza el cromatógrafo de gases con detector de captura electrónica y columna capilar. Se analizó quince plaguicidas organoclorados y quince plaguicidas organofosforados. Los compuestos determinados se enlistan en la Tabla 7.

Tabla 7. Plaguicidas analizados en muestras captadas en la zona interlagos.

Plaguicidas Organoclorados	Plaguicidas Organofosforados	Herbicidas
Alfa-BHC	Mocap	Ametrina
*HCB	Naled	Atraton
Beta-BHC	Forate	Atrazina
Lindano	Terbufos	Prometon
Delta-BHC	Diazinón	Prometrina
Heptacloro	Metil-paratión	Propazina
Aldrín	Malatión	Secbumeton
Heptacloro-epóxido	Fentión	Simazina
Alfa-endosulfano	Etíl-paratión	Simetrina
Dieldrín	Clorfenvinfos	Terbutilazina
pp-DDE	DEF	Terbutrina
Endrín	Etión	
Beta-endosulfano	Gutión	
pp-DDD	Zolone	
pp-DDT	Coral	
Toxafeno		

Para los plaguicidas organoclorados el Límite de Detección Mínimo (LDM), está en un rango de 0.09 – 8.70 ng.l⁻¹ y para los plaguicidas organofosforados el LDM se detecta en un rango de 15 a 100 ng.L⁻¹ (CIRA, 2010). Referido a los herbicidas el límite de detección osciló entre 69.55 a 186.38 ng.L⁻¹

-Isótopos estables

Se tomó 36 muestras para el análisis de los isótopos estables ^2H y ^{18}O en diferentes objetos hidrológicos: precipitaciones, pozos perforados, pozos excavados, Río Tipitapa, Laguna de Tisma, Lago Cocibolca, Lago Xolotlán, un manantial y en los min piezómetros instalados.

Para el muestreo de los isótopos se utilizó recipientes de 50 ml de material polietileno de alta densidad. En este muestreo se registró los datos físicos químicos de campo: pH, temperatura y conductividad eléctrica con los equipos pHmetro YSI 550^a y el Oxigenómetro YSI Waterproof.

Los criterios para seleccionar los puntos de muestreo fueron: que los objetivos hidrológicos interceptaran el flujo profundo y subsuperficial, caracterizar la composición isotópica de los lagos, laguna y ríos, analizar la huella isotópica de los piezómetros y mini piezómetros. Los puntos muestreados se muestran en la Tabla 8 y en la figura 20. De acuerdo a la composición isotópica, se ha identificado la relación Lago Xolotlán - acuíferos adyacentes.



Foto 9. Muestreo para el análisis de los isotopos estables.

Tabla 8. Fuentes muestreadas para el análisis de isótopos estables.

No	Muestra /Localización	NORTE	ESTE	TIPO
1	PM1 -LXA	1349255	596913	PP
2	PM3- RT	1349202	598563	PP
3	PM1-LXB	1349255	596913	PZ/PE
4	AS - Lago De Managua	1348000	595000	AS
5	ManantialTermalesTipitapa	1349176	598769	MN
6	PM1-RTA	1349210	597233	PP
7	PM2 - RTB	1348988	597415	MP/PE
8	PM2-RTA	1348988	597415	PP
9	MP –El Hatillo	1332691	618166	MP/PE
10	PP- Lo Ideal, El Hatillo	1332832	618133	PP
11	MP –Yadira Rocha	1334391	619406	MP/PE
12	PP- Hacienda La Chiripa	1347343	617319	PP
13	MP- Margarito Castillo	1339457	629357	MP/PE
14	MP- Hacienda San Pedro Malacatoya	1336776	625660	MP/PE
15	Punto Control Lago De Nicaragua	1335523	623213	AS
16	MP-Paso Panaloya	1339222	620432	MP/PE
17	Pozo ENACAL Ciudadela #1	1351071	598609	PP
18	AS- Laguna de Tisma	1339926	610943	AS
19	PE-El Cascajal	1341592	608076	PE
20	AS-RT Cascajal	1341592	608185	AS
21	MP-El Caballo Estero	1343590	607231	MP/PE
22	PE-Marvin Avilés	1343184	605503	PE
23	PP-Hato Grande	1343292	605065	PP
24	PP-El Náutico	1347732	603502	PP
25	PP-El Timal Cuadrante 85	1347965	604741	PP
26	PE-TISMA	1336014	609572	PE
27	Centro Recreativo Tisma1	1335741	608447	PP
28	PP ENACAL Tisma 1	1336401	606093	PP
29	PE-Rancho Verde	1342929	599931	PE
30	PP-Enacal Las Majadas	1345637	598839	PP
31	PP Pasckier	1347618	603794	PP
32	PP San Juan	1345086	605179	PP
33	PE-Ana Sandoval	1345388	604793	PE
34	El Timal Cuadrante 77	1348430	609480	PP
35	PE Rosa Hurtado	1348988	601965	PE

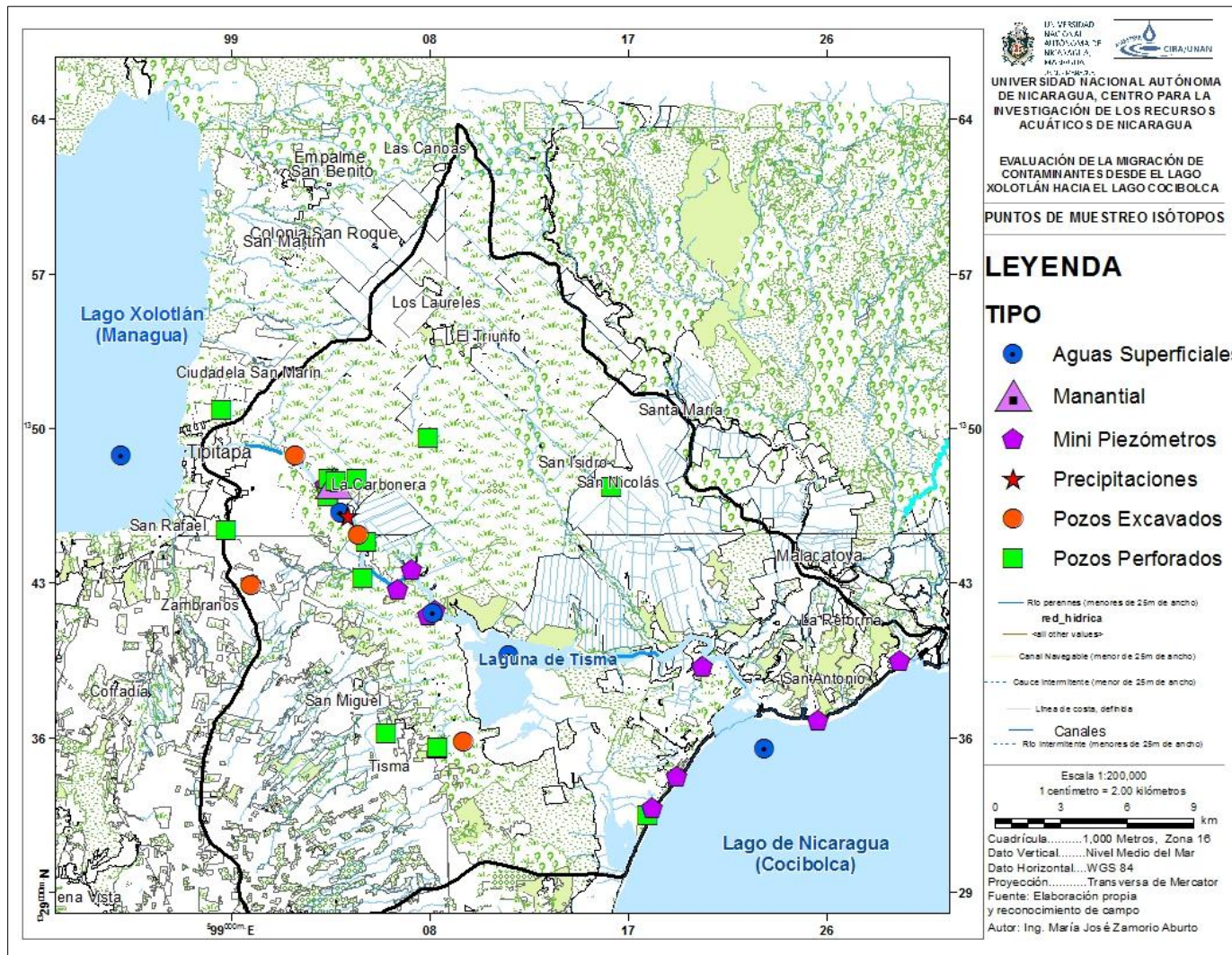


Figura 20. Puntos de muestreo de isótopos

El análisis de los isótopos estables fue realizado por el laboratorio *Isotope Science Laboratory*, el departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Calgary, Alberta Canadá.

VIII.4. Etapa 4: Procesamiento y análisis de la información.

Para procesar la información recolectada en campo se utilizó los programas ArcGIS 9.2, Excel y Aquachem. Para analizar la naturaleza hidroquímica del agua se utilizó los diagramas de Piper y Stiff. Los diagramas de Piper representan los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) y aniones mayoritarios (SO_4^{-2} , Cl^{-} y HCO_3). Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio 1965) y puede determinarse los procesos que puedan originar mezclas de aguas.

Los diagramas de Stiff al igual que el diagrama de Piper representan las concentraciones de los aniones y cationes mayoritarios en meq/l. Este tipo de técnica permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica). Los diagramas Stiff representan una muestra individual.

Para analizar la calidad de agua, los resultados fueron comparados con los parámetros establecidos por las Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano (CAPRE, 1994) y las Guías Canadienses de Calidad Ambiental (CCME, 2004) Esta última evalúa la probabilidad de riesgo que una concentración determinada en la matriz agua o sedimento pueda causar daños a los ecosistemas.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IX.1. Geología

El río Tipitapa constituye la vía natural que une el Xolotlán y Cocibolca. Estudiar su naturaleza es vital para entender el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas de la zona interlagos. Se ha señalado que, desde su formación, el río ha mostrado una dinámica cambiante, perceptibles en casos de ocurrencia de eventos sísmicos y meteorológicos extremos.

En el reconocimiento geológico realizado se determinó que el río corre sobre la formación Las Sierras. Se ha definido un sistema de fallamiento con dirección E – NE, el cual es interceptado por otro sistema de fallas de dirección N - NE a NE. Esta estructura crea una morfo tectónica de bloques levantados y hundidos, característico de un ambiente tectónico extensional. Esto le confiere cambios estructurales observados en la heterogeneidad del río. El fallamiento E – NE, es paralelo al río y luego migra hacia un fallamiento transversal, ambiente que origina un molde que controla la diferencia Sur del margen del río.

El cauce del río Tipitapa cambia de dirección en las coordenadas 603113 E y 1347588 N, lo cual se asocia al paso de la falla con dirección N-NE (0-15°) a NE (40-50 °). Luego, a partir del punto de coordenadas 603146 E y 1347597N, el lecho del río está levantado producto del fallamiento transversal.

En la Hacienda Hato Grande, se observó afloramientos de toba de estructura masiva. En este punto de la hacienda se observó un cambio en el comportamiento morfológico, de falla normal a falla inversa o de compresión. En este sector termina el bloque de fallas normales o de extensión.

El límite de la falla transversal se detectó en los puntos 603678 E y 1346430N, aún se continúa observando los márgenes del río bien definidos. Esta parte del río es navegable, no se observa diferencia de elevación entre los márgenes. A partir de este punto se entró a un nuevo terreno geológico, en la Hacienda el Cascajal, se observó la formación de suelo residual, además del levantamiento de un bloque relativamente impermeable. El valle es cuasi plano, con ondulaciones suaves, el afloramiento poco permeable hace que el agua no se infiltre, provocando estancamiento. La elevación en este punto es de 47 m.s.n.m.

Finalmente, en el Paso Panaloya, se observó un ambiente geológico diferente al de las cercanías al lago Xolotlán. Afloran Sedimentos Volcánicos, que comprende una secuencia interestratificada y casi laminar de material piroclástico, asociadas al complejo volcánico Masaya de edad Plio Pleistocénico. Constituye una pseudo estratificación de sedimentos volcánicos, o delgadas capas de piroclastos deleznales. La estratificación se puede observar en las cárcavas que drenan hacia el cauce del Río Tipitapa. Los afloramientos presentan hasta 3 metros de alto. Se identifican capas delgadas de arena fina volcánica color negro intercaladas con pómez muy alteradas en transición a suelo limoso color pardo claro, Toba arenosa gruesa, Toba limo pomácea blanquecina, arcilla negra plástica y Toba arenosa gruesa granular (INETER, 2010).



Foto 10. Exposición de fragmentos de pómez transportados, Paso Panaloya, desembocadura Río Tipitapa – lago Cocibolca.,

IX.2. Hidrogeología

IX.2.1.Niveles de agua

Referente a los niveles de agua subterránea, Arriola (2012) define que las profundidades del agua en los pozos cercanas al área norte del río Tipitapa están entre 1 y 20 m, en áreas más cercanas al río se observó a 2 m. En la zona específica estudiada los niveles de agua oscilan entre 1 a 2 metros.

Se presentan los niveles estáticos de los 22 pozos excavados monitoreados en la zona de descarga o interlagos. Los niveles de agua oscilaron entre casi a nivel del suelo a 14.5m. Las mayores profundidades del NEA se midieron en el área de Tipitapa (14.5 a 5.9 m). Los menores niveles se registraron en el área de los humedales de Tisma, prácticamente en esta época los niveles de agua están a nivel del terreno o sobre éste.

A medida que se descende en altitud, los niveles también disminuyen, reflejando relación con la topografía. En el área de La Carbonera y San Juan de la Plywood se midieron niveles entre 1.36 a 4.42 m. Específicamente en el sector Sur del lago Xolotlán, conocido como La Bocana el nivel de agua está a 1.39 m, este dato contrasta con el comportamiento de la zona de interlagos y tal como se ve en el mapa, la Falla Cofradía separa las áreas, lo que sugiere que son sistemas hídricos diferentes. Figura 21.

En relación a los pozos perforados, de los pocos puntos medidos, se observó que el agua afloraba al nivel del terreno, este comportamiento sugiere la existencia de confinamiento en ciertas áreas. El artesianismo fue observado en el área de la Hacienda El Quemado, Hacienda Pasquier, El Timal y Hacienda San Juan, ver figura 22.

La calidad de agua de estos pozos, por su carácter de flujo profundo se utiliza para evaluar la migración de contaminantes desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca.

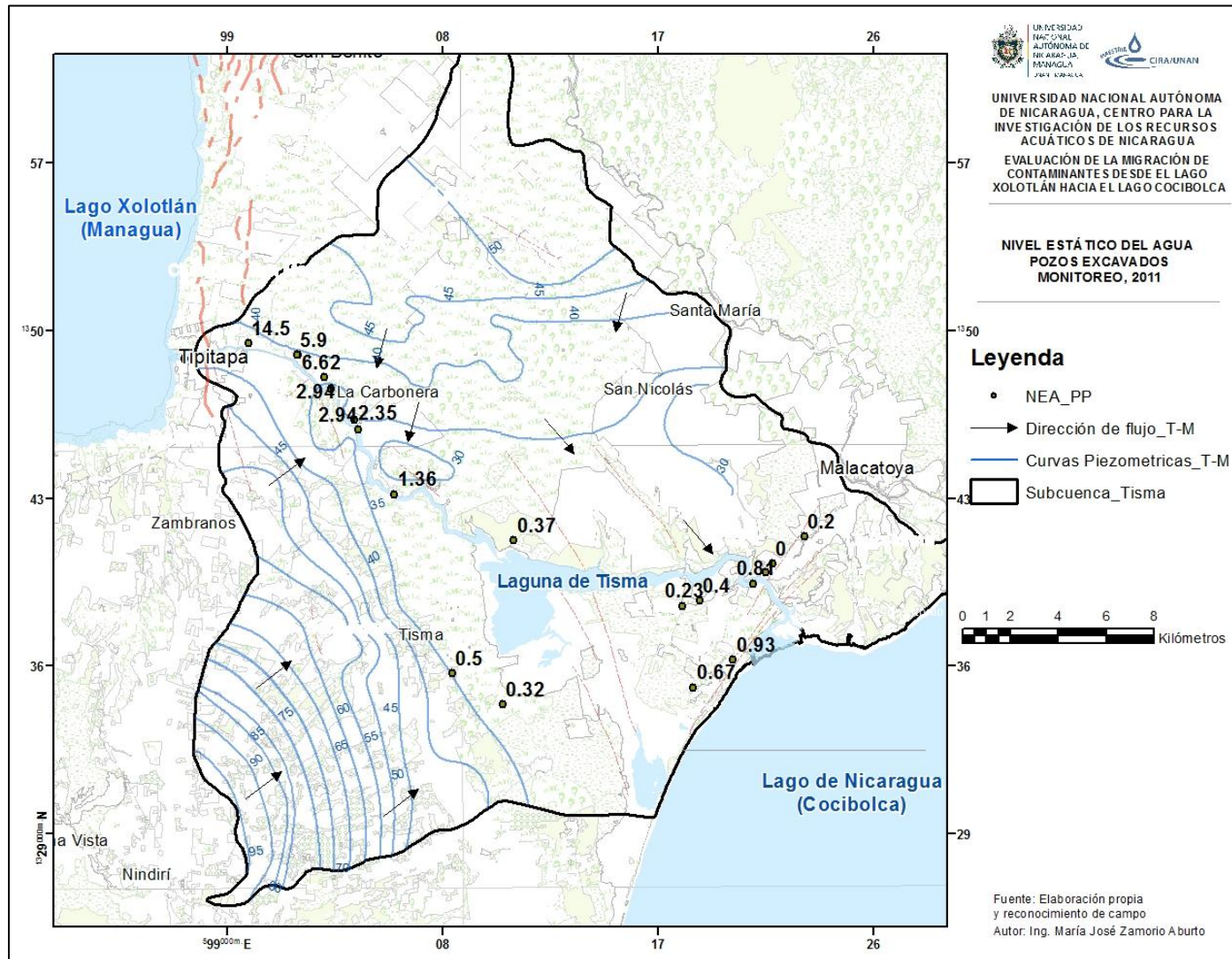


Figura 21. Niveles de agua medidos en reconocimiento de campo desde la naciente del Río Tipitapa en el lago Xolotlán hasta su descarga al lago Cocibolca.

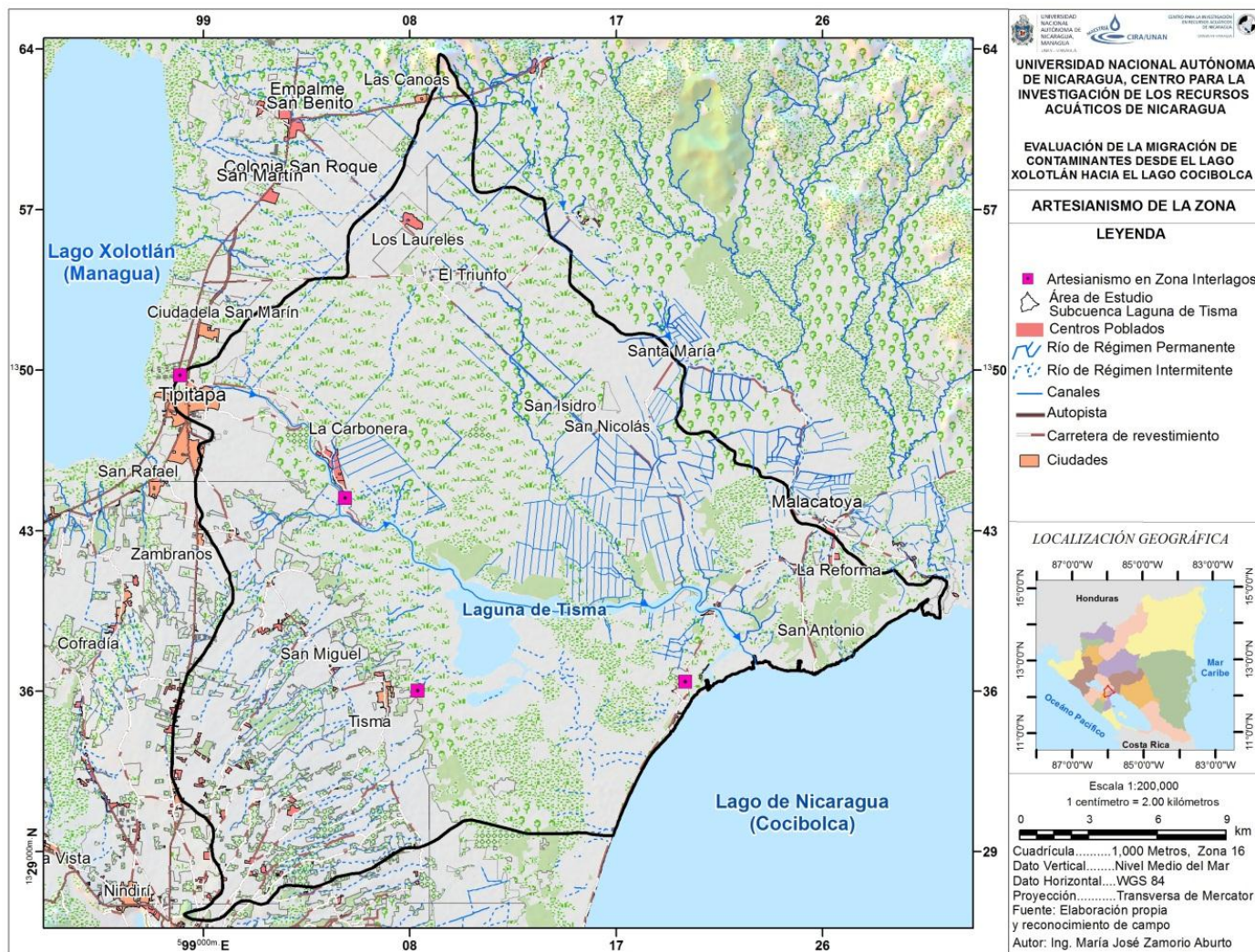


Figura 22. Artesianismo observado en la zona interlagos.

IX.2.2. Gradiente hidráulico vertical en el área del lago Xolotlán

Para conocer la hidrodinámica del lago hacia el río Tipitapa se midió el gradiente hidráulico vertical en los piezómetros instalados en la costa del lago Xolotlán, cercano al sector de la Bocana y del piezómetro instalado cercano a los termales de Tipitapa.

Los piezómetros multiniveles PM-LX y PM – RT mostraron un incremento en la carga hidráulica a medida que incrementó la profundidad, la relación es de descarga, es decir el movimiento del agua es ascendente. La dirección y magnitud del gradiente hidráulico indica una descarga de aguas subterráneas hacia el lago Xolotlán bajo estas condiciones se descarta la migración de la contaminación del Lago Xolotlán hacia el acuífero adyacente., Figura 23.

El multi piezómetro ubicado en el margen Sur del Río presentó la situación opuesta, los cálculos de la carga hidráulica y del gradiente determinaron una recarga del Lago Xolotlán hacia el acuífero. En los pozos excavados ubicados en este sector también muestra influencia del Lago sobre las aguas subterráneas. La conductividad eléctrica medida en los pozos fue mayor a 1000 uScm^{-1} .

Este comportamiento del gradiente hidráulico sustenta los resultados obtenidos en el reconocimiento geológico, tal como se mencionó, el Río Tipitapa transcurre sobre un sistema de fallas con dirección E-NE, interceptado por otro sistema de dirección N-NE a NE, este ambiente entre el Lago y el Río crea bloques morfo tectónicos hundidos y levantados producto del esfuerzo extensional, que están controlando el movimiento de las aguas. Sin embargo, la influencia de recarga Lago es puntual y no abarca más allá del sistema de Falla de Cofradía.

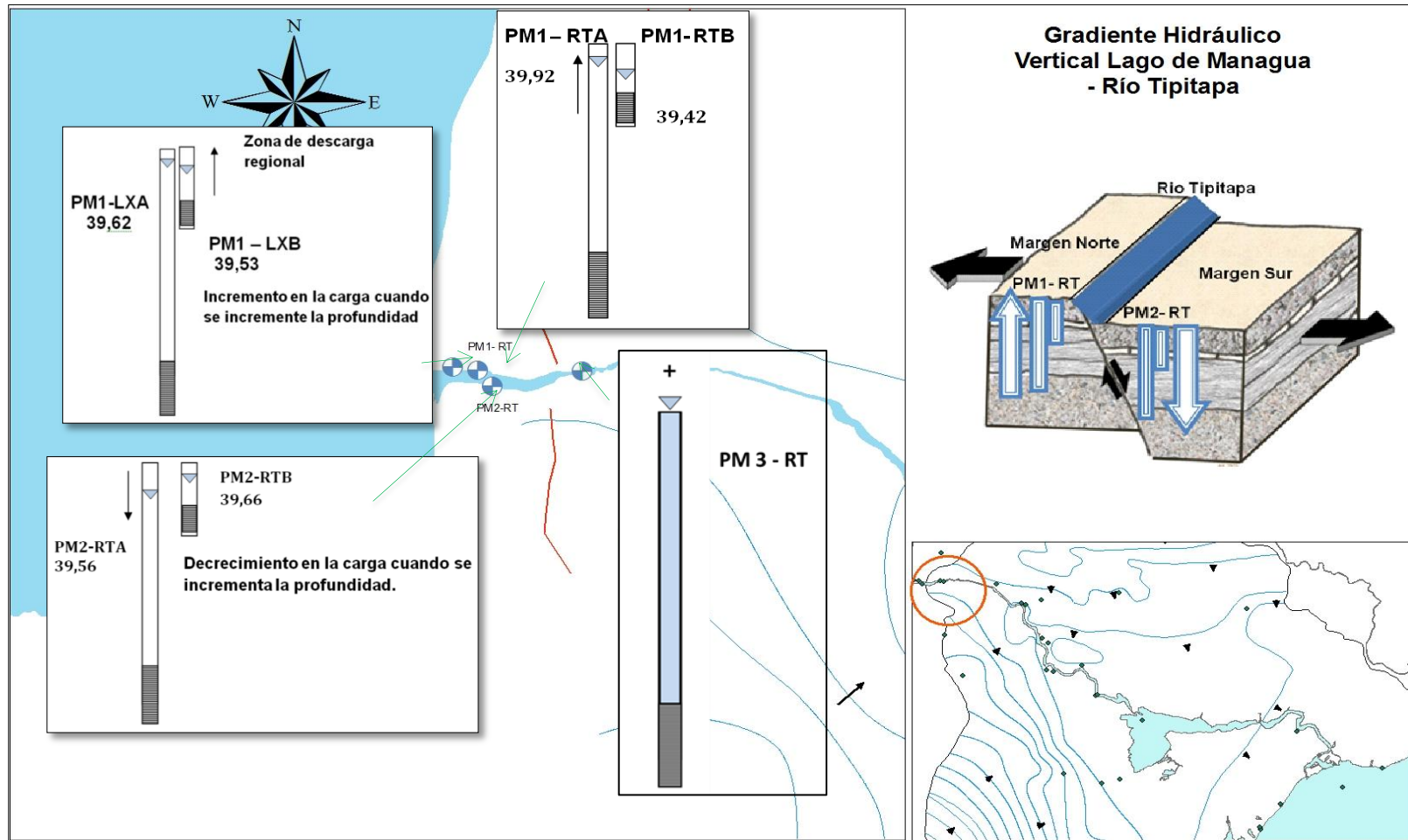


Figura 23. Cargas hidráulicas y gradiente hidráulico vertical en piezómetros ubicados en la naciente del Río Tipitapa y cercano a los termales Tipitapa.

IX.3. Hidroquímica

IX.3.1. Parámetros físicos químicos de campo

Los valores de los datos físico químicos tomados durante el reconocimiento de campo en la zona de interlagos de pH, temperatura y conductividad eléctrica, difieren significativamente entre los pozos perforados y los pozos excavados. Figura 24.

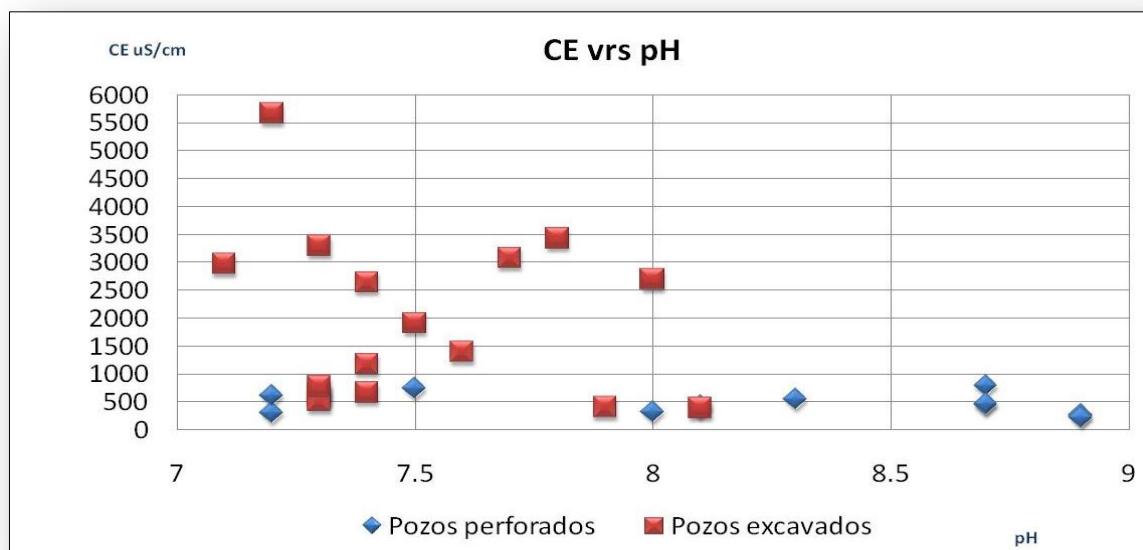


Figura 24. Relación entre el pH y la Conductividad Eléctrica de los Pozos Perforados y Excavados.

Los valores de pH en los pozos excavados oscilan entre 7.1 y 8, 2. Los datos de temperatura no sobrepasan los 33.4⁰C. La conductividad eléctrica oscila en un mínimo de 392 μ S/ cm y un máximo de 5670 μ S/cm. Los valores máximos de CE eléctrica se midieron entre la Laguna de Tisma y las márgenes del Lago Cocibolca. Figura 25.

El pH en los pozos perforados (PP) presenta una media de 8.1, con valor mínimo de 7.2 y un máximo de 8.9

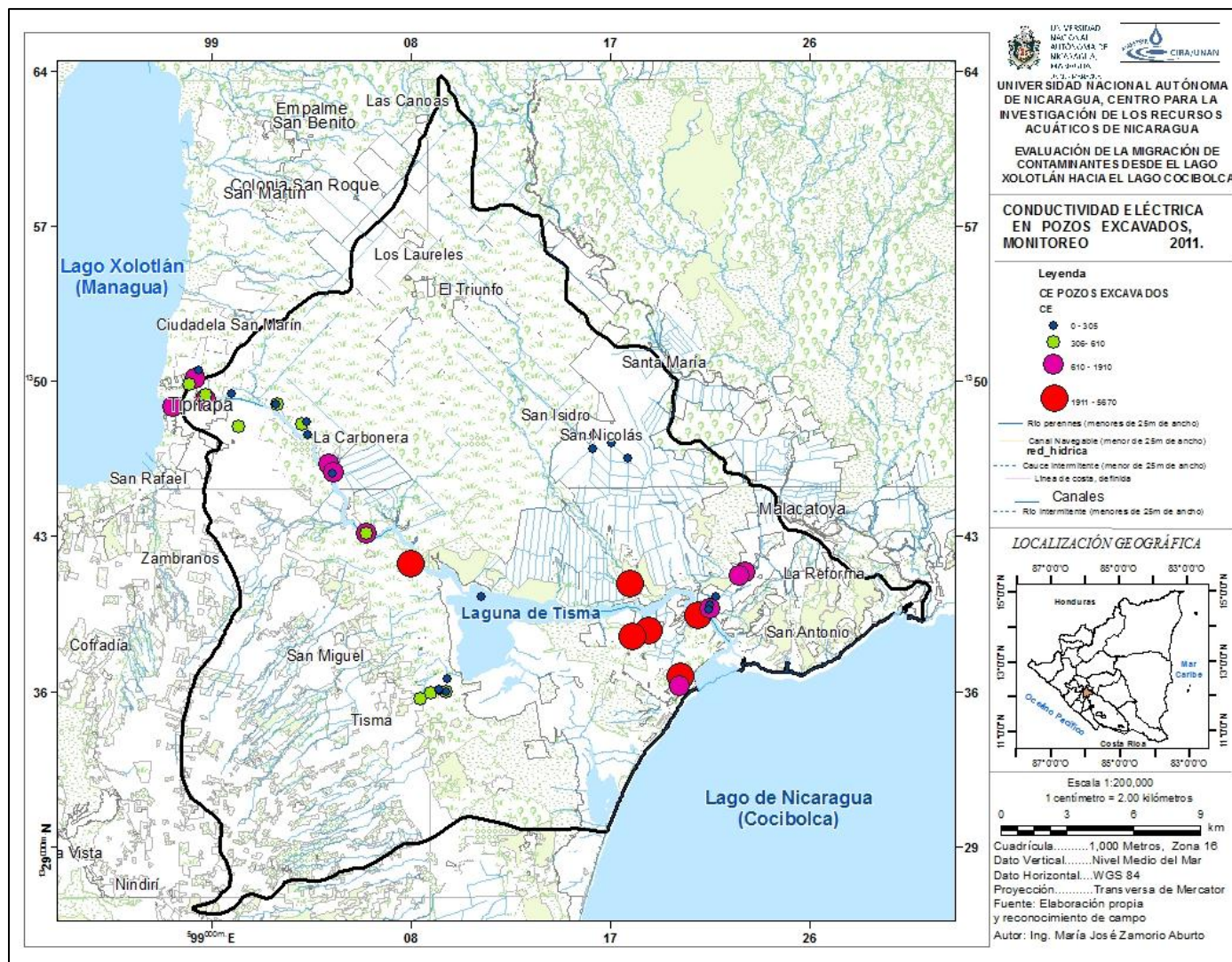


Figura 25. Distribución espacial del parámetro Conductividad Eléctrica medida en los pozos excavados.

Nótese en el mapa de distribución espacial de la CE que se registró valores mayores a $668 \mu\text{Scm}^{-1}$ y menores a $1910 \mu\text{Scm}^{-1}$, en las áreas comprendidas entre la salida del lago Xolotlán al río Tipitapa y a lo largo del río. La CE aumenta a medida que se transcurre a lo largo del río, Laguna de Tisma y llegando a la desembocadura del Lago Cocibolca. Es importante relacionar que los flujos son subsuperficiales. Estos valores pueden relacionarse con la interacción que puede existir en el Río que transporta las aguas contaminadas del Lago Xolotlán y por las diferentes actividades desarrolladas en el área, también se infiere que las diferentes actividades antropogénicas también pueden afectar la calidad de agua. Durante el reconocimiento se observó que muchos de estos pozos están en medio de corrales, letrinas, basureros clandestinos y en particular en el área del Paso Panaloya los pozos excavados se localizan gradiente abajo de un cementerio. Tal como se describió en el ítem anterior los niveles de agua en los pozos de Paso Panaloya oscilan de 0.93 m a 0.2 m, bajo estas condiciones existe la interacción entre las aguas subsuperficiales con los diferentes focos de contaminación.

En los pozos perforados los valores de conductividad eléctrica presentaron una media de $472 \mu\text{S/cm}$. En los pozos ubicados cerca al río Tipitapa se midió valores entre $490 \mu\text{Scm}^{-1}$ a $264 \mu\text{Scm}^{-1}$. Estas concentraciones son bajas por lo que se descarta una mezcla entre las aguas del Xolotlán y las aguas subterráneas del acuífero Regional Las Sierras y del acuífero Tipitapa Malacatoya.

En el área de la Bocana se registró valores de CE de 550 y $608 \mu\text{Scm}^{-1}$, según la piezometría estos pozos se ubican en el área de descarga del acuífero Tipitapa Malacatoya cuyo recorrido a través del medio hidrogeológico le confiere esos rangos de conductividad.

En el área comprendida en la zona de descarga hacia el lago Cocibolca el PP monitoreado tiene un valor de $323.9 \mu\text{Scm}^{-1}$. El máximo valor registrado de CE fue en el área del campo de Pozos Tisma ($793 \mu\text{cm}^{-1}$), en este sitio se registró temperaturas mayores a 34°C , por lo que la anomalía se asocia a procesos termales en el área de Tisma. Figura 26.

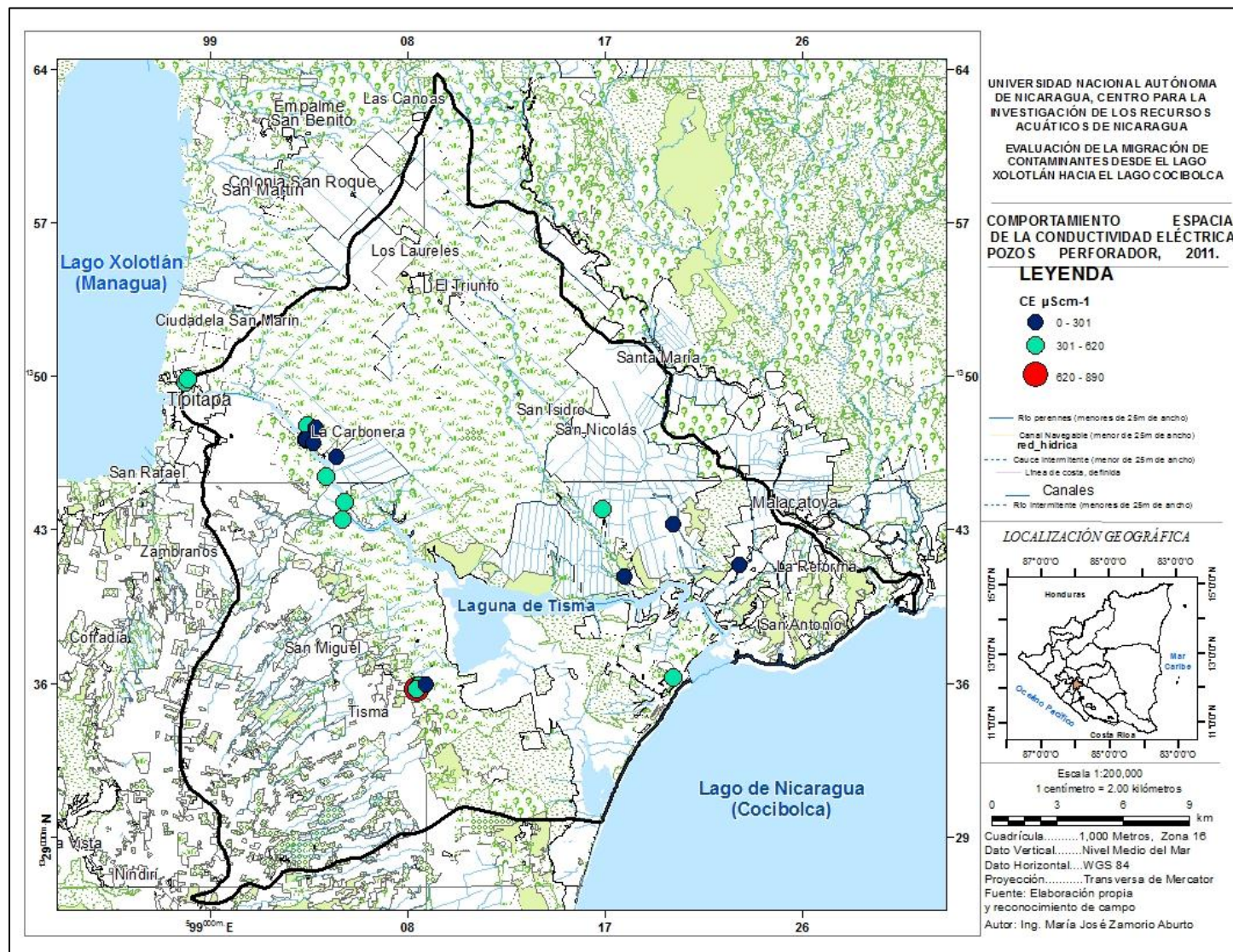


Figura 26. Comportamiento espacial de la Conductividad Eléctrica en los Pozos Perforados, monitoreo 2011.

También se analizó la variable temperatura, la cual osciló en un rango entre 41.4 °C y 29.1 °C. De acuerdo a Bogomolov y Silin – Betchurin citado por (Custodio, 2001) se clasifican en moderadamente tibias ($25 < t \leq 37$ °C) calientes ($37 < t \leq 42$ °C) y muy calientes ($t > 42$ °C). Por lo tanto, las aguas subterráneas en pozos perforados se clasifican como moderadamente tibias y calientes. Las anomalías en la temperatura se localizan el área de los termales de Tipitapa, sector La Carbonera y en el campo de pozos de Tisma. La elevada temperatura está asociada a procesos termales del área.

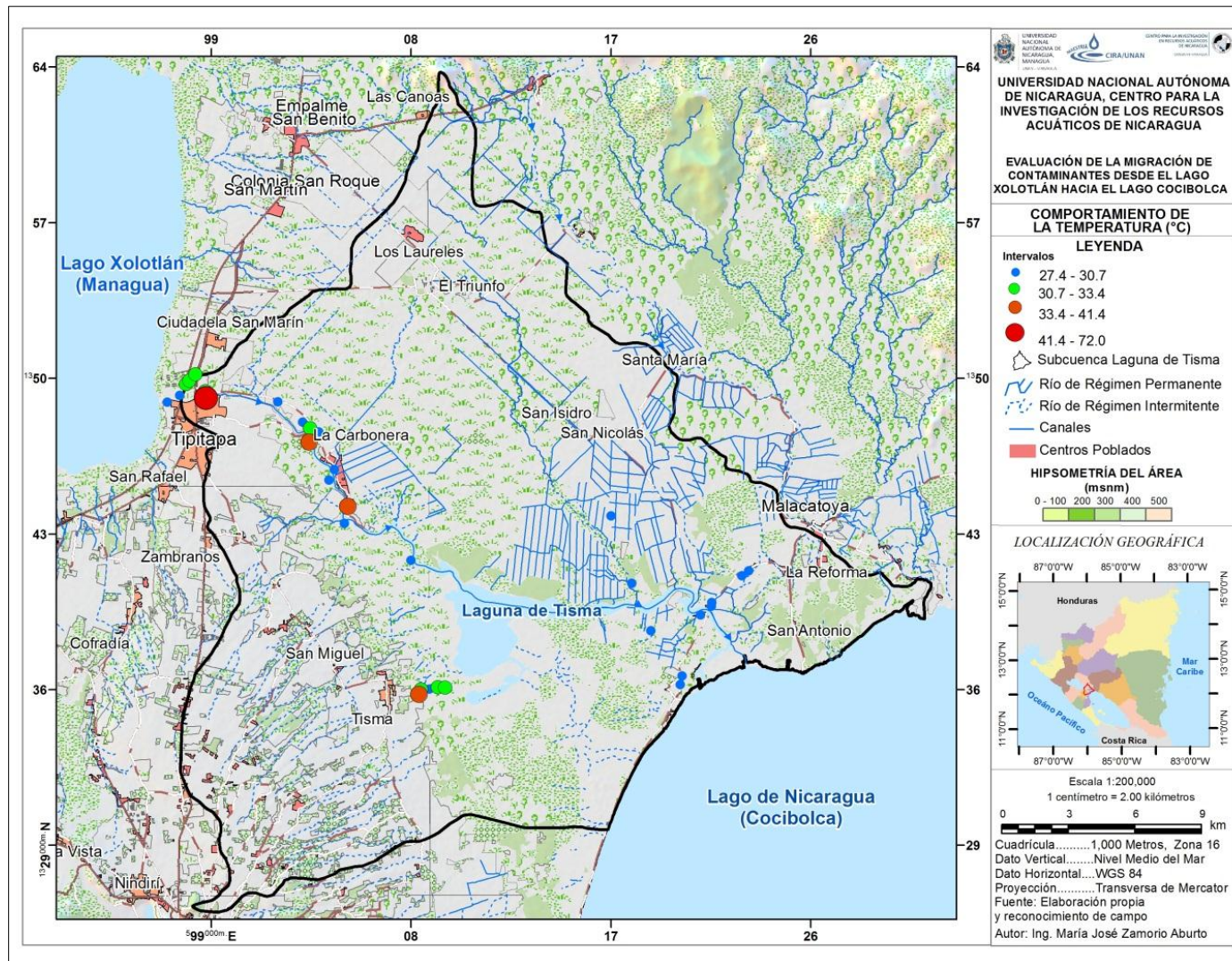


Figura 27. Comportamiento espacial de la temperatura en muestreo de 2012.

IX.3.2.Caracterización Hidroquímica

La Hipótesis de esta tesis plantea que las sustancias disueltas en el Lago Xolotlán pueden viajar a través de los terrenos permeables que pudiesen estar conectando con el Lago Cocibolca, por tanto, estudiar la composición hidroquímica es una herramienta importante que muestra las variaciones en la concentración de las sustancias y su naturaleza.

IX.3.2.1. Aguas superficiales

El carácter hidroquímico del Xolotlán corresponde al tipo Bicarbonatada Sódica, consideradas aguas de descarga regional, es decir, en el lago descargan las aguas subterráneas maduras del acuífero Las Sierras. Figura 28.

En el diagrama de Piper se observa una tendencia de las aguas del Lago de Bicarbonatada Sódicas a aguas Cloruradas, producto de la alta tasa de evaporación, aporte de aguas termales y las descargas de las aguas residuales domésticas con alto contenido de sales. La conductividad eléctrica medida en el Lago Xolotlán, fue de $1294 \mu\text{Scm}^{-1}$.

Por otro lado, el Lago Cocibolca, muestra un tipo Bicarbonatado Cálcico Sódico y presenta bajos valores de conductividad eléctrica ($274 \mu\text{Scm}^{-1}$). A diferencia del Xolotlán la extensión del Cocibolca es 7 veces mayor, en él descargan aguas subterráneas y superficiales. La naturaleza hidroquímica determinada en esta tesis es coherente con los resultados del estudio “Caracterización Hidrogeológica e Isotópica del Lago de Nicaragua” realizado por INETER (2009) con la asesoría científica del Organismo Internacional de Energía Atómica. En este estudio se realizó el análisis del isótopo Tritio para determinar la datación de las aguas y se concluyó que en los últimos 40 años las aguas del Cocibolca se han renovado permanentemente a través de la recarga y la descarga por el río San Juan.

El tipo hidroquímico del Río Tipitapa y la Laguna de Tisma se caracterizan por ser del tipo Bicarbonatada Sódica, con tendencia a Cloruradas. La naturaleza hidroquímica que presentan ambos cuerpos de agua manifiesta que lago Xolotlán aporta significativamente a su alimentación.

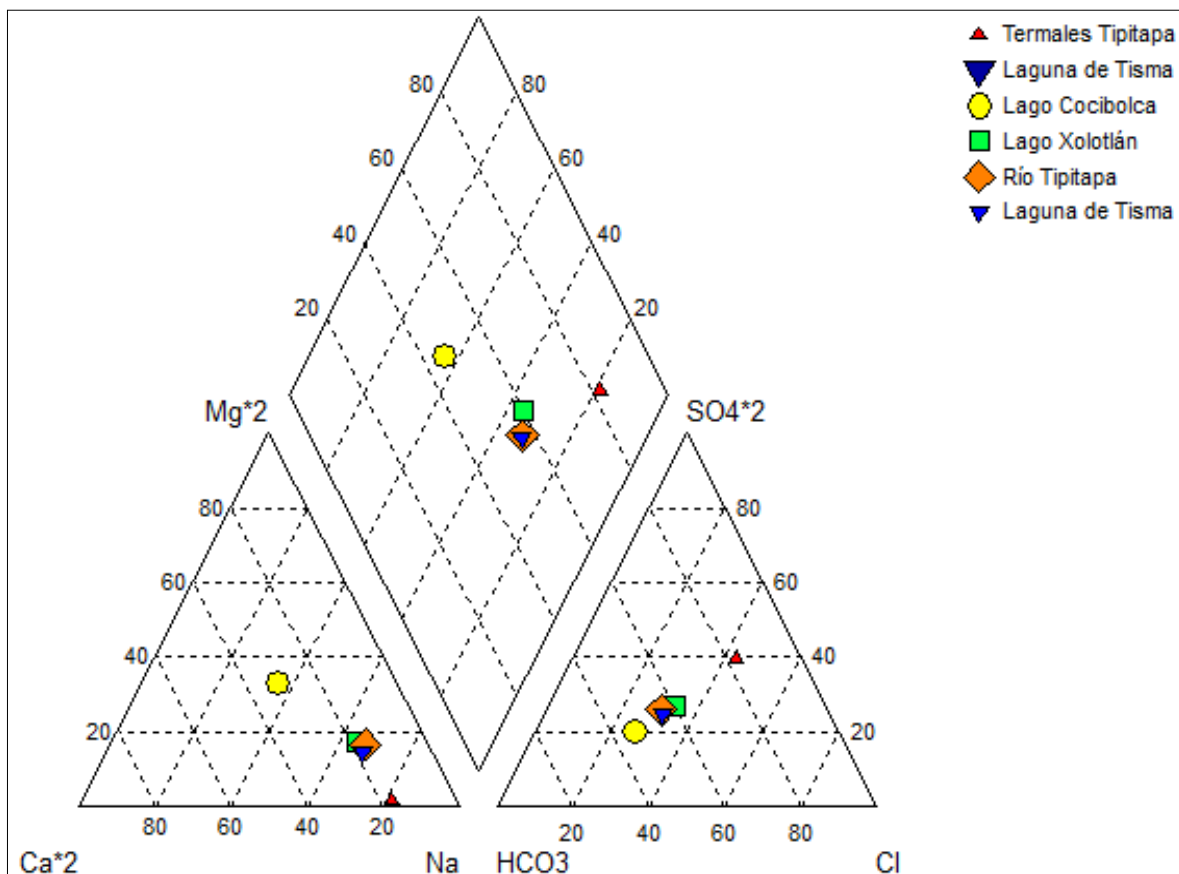


Figura 28. Diagrama de Piper en aguas superficiales.

La figura 29 muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica, la cual se compara con los datos de dureza, color verdadero, alcalinidad y pH de los lagos, el Río Tipitapa y la Laguna de Tisma. Dos aspectos importantes resaltan del esquema, el Lago Xolotlán ejerce una influencia significativa sobre la Laguna de Tisma, la cual parece actuar como zona de amortiguamiento para el Lago Cocibolca, que se presenta con bajas concentraciones de los parámetros señalados.

La CE del Xolotlán es de $1294 \mu\text{Scm}^{-1}$ y la del Cocibolca de $274 \mu\text{Scm}^{-1}$. Bajo estas condiciones los lagos difieren significativamente en su calidad química.

La dureza definida como la suma de cationes polivalentes, pero principalmente por el Calcio y el Magnesio se determinó en el Cocibolca un valor de 59 mgL^{-1} de

CaCO₃, clasificada como ligeramente dura (Water Quality Association, año), en el Lago Xolotlán la dureza es de 127 mgL⁻¹ de CaCO₃, considerada como “Dura”.

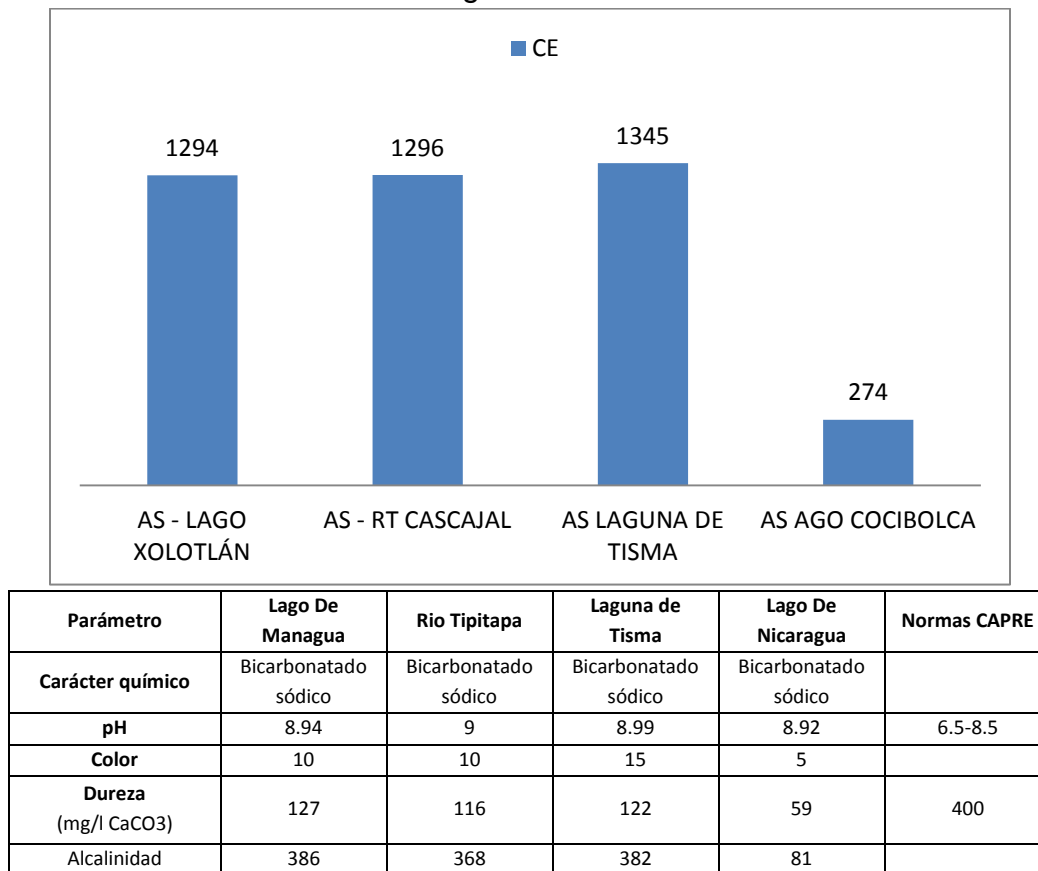


Figura 29. Conductividad Eléctrica en Aguas Superficiales y tabla con valores de Color, Dureza y Alcalinidad.

Referente al Color, el cual está asociado a la presencia de material orgánico disuelto es mayor en la Laguna de Tisma (15 mg/L Pt-Co), el cual probablemente se deba a la productividad primaria de Tisma y al material disuelto proveniente del Lago Xolotlán. El valor más bajo registrado del color fue en el Cocibolca (5 mg/L Pt-Co)

En relación a la abundancia y relación en la composición catiónica y aniónica, difiere significativamente entre ambos lagos, el lago Xolotlán muestra una composición en abundancia muy marcada por los iones sodio, potasio y cloruros (Figura 30).

A nivel superficial se observa que no existe diferencia significativa entre las relaciones de mili equivalentes de los iones detectados en el Río Tipitapa y la Laguna de Tisma, infiriendo que la alimentación depende significativamente del flujo proveniente del Lago.

Por el contrario, el Lago Cocibolca muestra una composición iónica muy distinta al Lago Xolotlán el contenido en mili equivalente en sodio y cloruros es nueve veces menor, la naturaleza hidroquímica de los lagos es muy distinta. Figura 30.

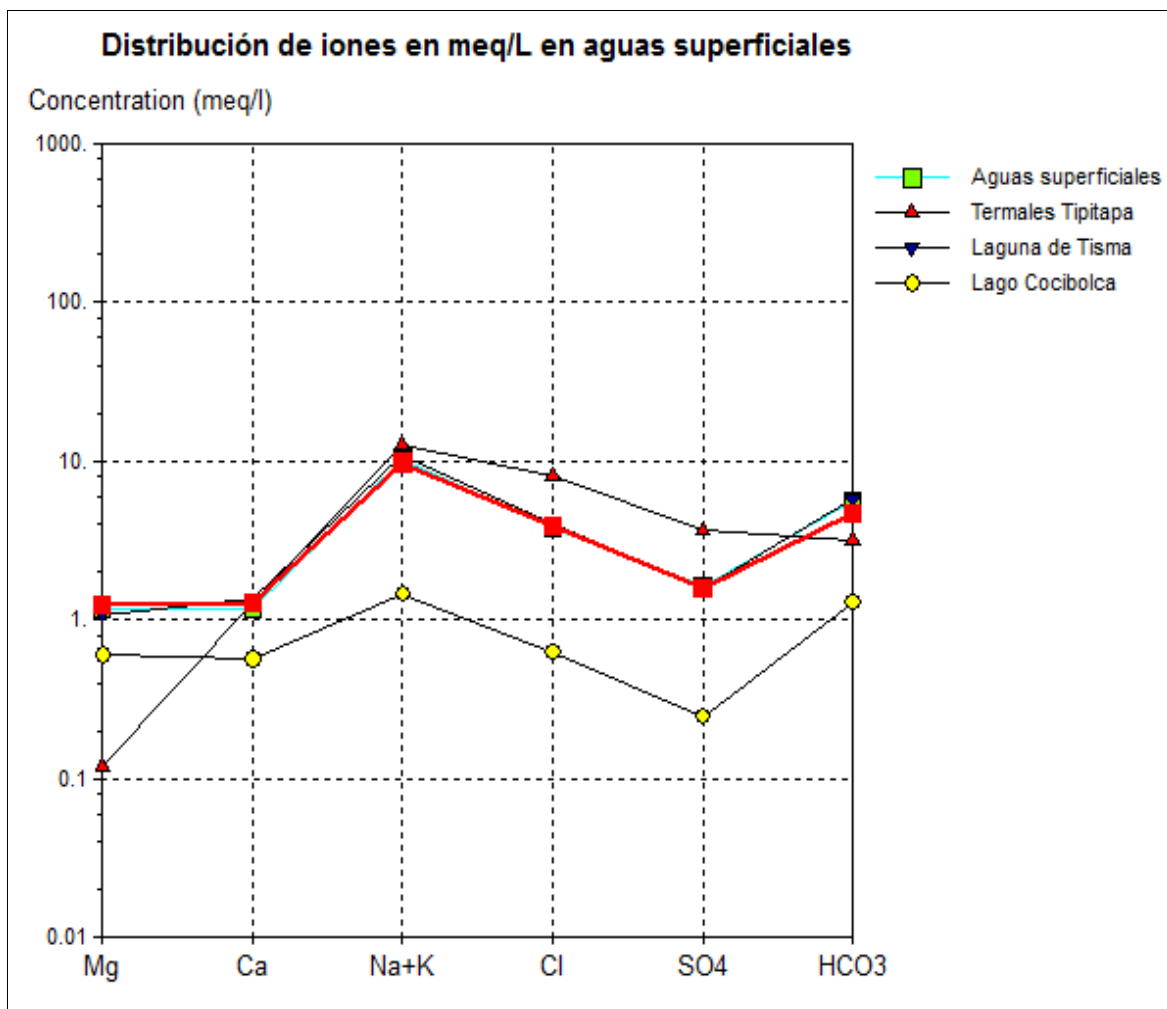


Figura 30. Diagrama Schoeller en aguas superficiales.

IX.3.2.2. Aguas subterráneas

La zona de interlagos se inserta dentro de dos acuíferos importantes, el Acuífero Tipitapa – Malacatoya y el Acuífero Regional Las Sierras. El gráfico de Piper, muestra la predominancia de dos tipos hidroquímicos de agua: Las aguas del acuífero Las Sierras son Bicarbonatadas Sódicas debido a su mayor recorrido, sufriendo procesos de intercambio de bases, mayor tiempo de residencia y contacto con el material acuífero. El acuífero Tipitapa Malacatoya muestra aguas

Bicarbonatadas Cálcidas Magnésicas a Sódicas, las cuales son aguas jóvenes, de recarga reciente. Esto indica que en esta área juega un rol importante la recarga local. En menor medida en el gráfico sobresale aguas del tipo Clorurada Sódica, las cuales son consideradas de mala calidad, cuyo origen puede ser la actividad termal del área. Figura 31. Los resultados de esta investigación concuerdan con el mapa de la Figura 10 antecedentes hidroquímicos elaborado por INETER (2010).

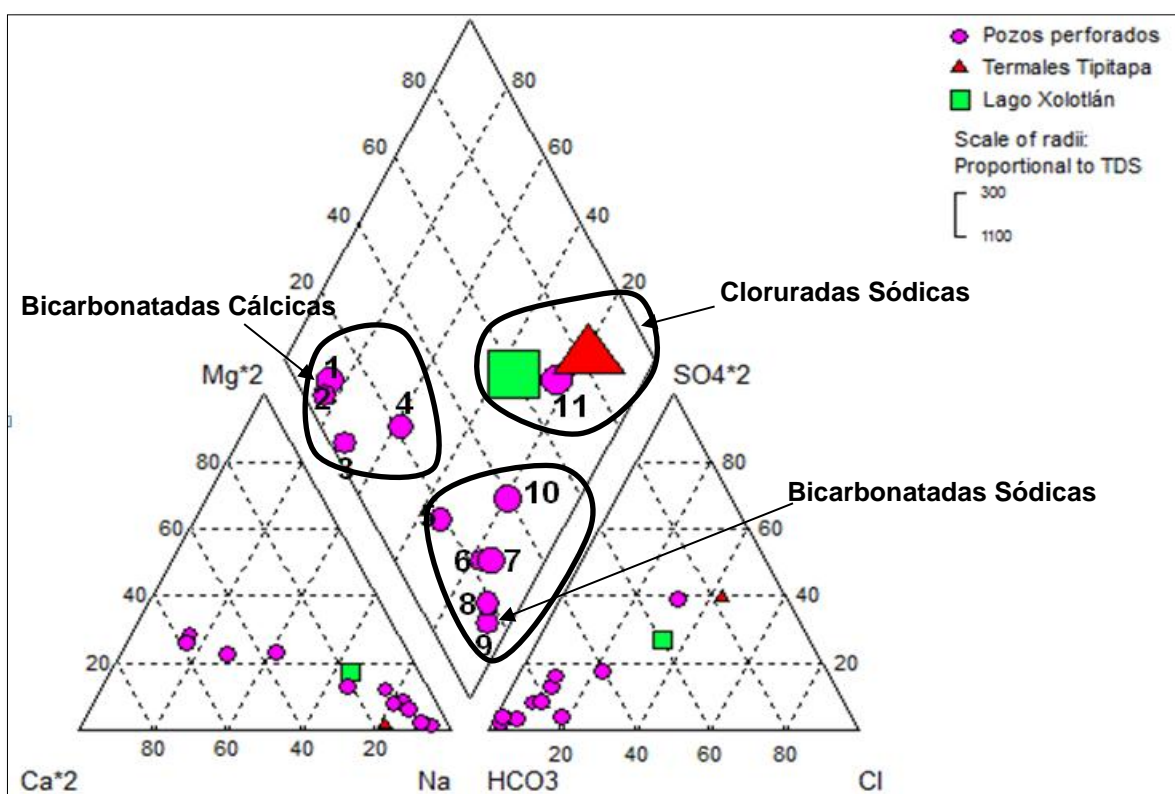


Figura 31. El tipo hidroquímico es proporcional al contenido de Sólidos Totales Disueltos

Tabla 9. Tipo Hidroquímico de pozos perforados.

Código	Ubicación	Tipo Hidroquímico
1	Hacienda La Chiripa/ *AT-M	Bicarbonatadas Cálcicas
2	Enacal Ciudadela/ AT-M	Bicarbonatadas Cálcicas
3	El Timal Cuadrante 77/AT – M	Bicarbonatadas Sódicas Cálcicas
4	Enacal Tisma /**ALS	Bicarbonatada Sódica Cálcicas
5	Enacal Las Majadas/ALS	Bicarbonatadas Sódicas
6	PP- Pasckier/ALS	Bicarbonatadas Sódicas
7	PP- San Juan/ALS	Bicarbonatadas Sódicas
8	PP- Hato Grande/ALS	Bicarbonatadas Sódicas
9	PP – El Náutico/ALS	Bicarbonatadas Sódicas
10	PP – Sistema de Agua Lo Idea El Hatillo/ALS	Bicarbonatadas Sódicas Cloruradas
11	Centro Recreativo Tisma/ALS	Cloruradas Sódicas

*ATM = Acuífero Tipitapa Malacatoya

** ALS= Acuífero Las Sierras

En la tabla 9 se describe según la clasificación y ploteó en el diagrama de Piper la naturaleza hidroquímica de las aguas. Las aguas Bicarbonatadas Cálcicas son de recarga reciente. Según la clasificación de Domenico (1998) referido a las zonas de profundidad, estas aguas son parte de la zona superior del acuífero Tipitapa Malacatoya, con flujo activo, generalmente de recorrido corto y tiempo de recorrido de años a decenas de años. El contenido de sólidos totales disueltos es bajo (> 250mg/L), nótese la escala proporcional a los STD. Figura 31. En este grupo se ubican los tres pozos muestreados del acuífero Tipitapa Malacatoya (1,2, 3 Tabla 9).

A este grupo también pertenece El pozo ENACAL Tisma, el cual es parte del acuífero Regional Las Sierras, el tipo hidroquímico de sus aguas, indica la importancia de una recarga local del acuífero Las Sierras en cotas superiores a los 50 m.s.n.m.

El segundo grupo corresponde a aguas del tipo Bicarbonatadas Sódicas, con mayor recorrido y tiempo de residencia que las aguas Bicarbonatadas Cálcicas. El agua sufre un proceso de ablandamiento por intercambio de bases, los cationes calcio y magnesio son intercambiados por el sodio dentro de la matriz del acuífero. En este tipo de agua el catión predominante es el sodio y el anión predominante es el bicarbonato. Sin embargo, en este grupo observamos mezcla de aguas subterráneas. Se observa tendencia a aguas cloruradas sódicas, relacionadas a las actividades tectónicas y termales del área, tal como se observa en el punto 10

Finalmente, se observa un pozo con aguas del tipo Cloruradas Sódicas, cuyo tipo hidroquímico es similar a los Termales de Tipitapa. El pozo se ubica en las cercanías de la Laguna de Tisma, tiene una profundidad mayor a los 90 metros, y claramente se observa la influencia de la actividad termal de la zona, que le confiere el carácter Clorurada Sódica, además en este pozo se midió una temperatura de 37.1 °C.

Se tomaron cinco muestras de pozos excavados y en el diagrama de Piper se comparan los resultados con el agua de los lagos y la laguna de Tisma. Esta información determina que existe una relación entre las aguas superficiales y las aguas subsuperficiales. Figura 32, Tabla 10.



Tabla 10. Tipo Hidroquímico de Pozos Excavados

Código	Ubicación	Tipo Hidroquímico
1	Pozo Rosa Hurtado **AT-M	Bicarbonatada Cálctica
2	Pozo Rancho Grande ** ALS	Bicarbonatada Cálctica Magnésica
3	Pozo El Cascajal**	Bicarbonatada Sódica
4	Pozo Marvin Avilés **	Bicarbonatada Sódica
5	Pozo Tisma **	Bicarbonatada Sódica

En el diagrama observamos la formación de dos grupos bien marcados, el primero corresponde a aguas del tipo Bicarbonatadas Cálcticas, en él se ubica los pozos de Rosa Hurtado y Rancho Grande. El pozo Rancho Grande es parte del acuífero Regional Las Sierras, ubicado sobre la cota de 80 m.s.n.m. El pozo excavado de la señora Rosa Hurtado, está ubicado muy cerca del río Tipitapa, en las coordenadas N 1348988 y E 601965.

El segundo grupo tiene la naturaleza de aguas Bicarbonatadas Sódicas, correspondiente a aguas de descarga regional. También, en el diagrama de Piper observamos claramente una zona de mezcla entre aguas del acuífero Las Sierras y aguas del Lago Xolotlán que escurren sobre el río Tipitapa a partir de las coordenadas N 1343590 y E 607231.

En el diagrama la concentración de STD es proporcional al tamaño de los símbolos. Las mayores concentraciones de SDT se registran en las aguas mineralizadas y en los pozos cercanos al río Tipitapa y en la desembocadura del Xolotlán hacia el Lago Cocibolca, cerca del área de Paso Panaloya. La zona de mezcla ocurre a partir de las coordenadas 1343392 /604989, estas anomalías en la composición química del agua son coherentes con los cambios estructurales a lo largo del río.

Mini piezómetros y Piezómetros.

Hidrogeológicamente la ubicación de los piezómetros corresponde a áreas de descarga regional de las aguas subterráneas provenientes de los acuíferos Las Sierras y Tipitapa Malacatoya.

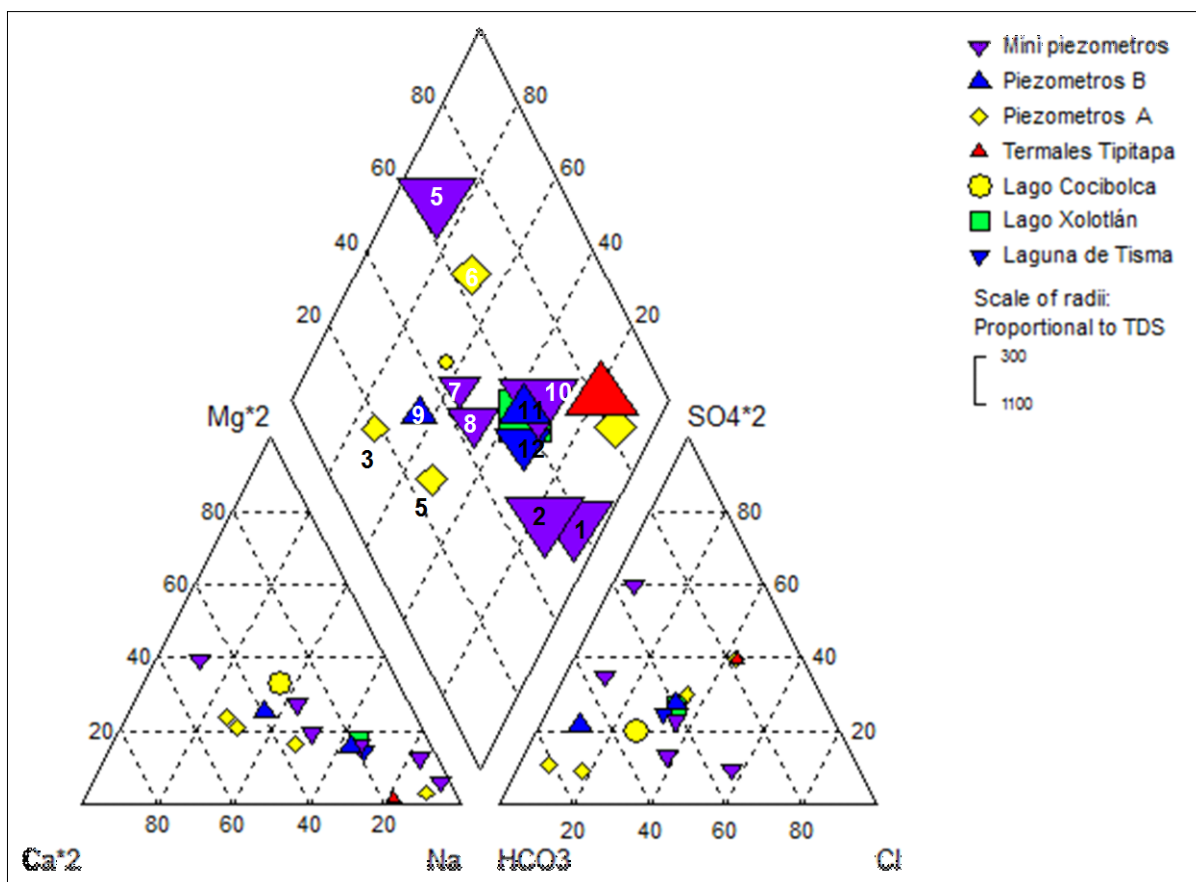


Figura 33. Tipo Hidroquímico de Piezómetros y Mini piezómetros

Tabla 11. Tipo Hidroquímico Piezómetros y Mini piezómetros.

Código	Ubicación	Tipo Hidroquímico
1	MP – Yadira Rocha	Cloruradas Cálctica
2	PM2 - RTA	Bicarbonatada sódica clorurada
3	MP – El Hatillo	Bicarbonatada sódica
4	MP – Margarito Castillo	Bicarbonatada sódica
5	PM1- LXB	Bicarbonatada sódica cálcica.
6	MP- Hacienda San Pedro	Bicarbonatada sódica sulfatada
7	PM2-RTB	Bicarbonatada sódica clorurada
9	MP- Estero El Caballo	Bicarbonatada sódica clorurada
10	MP- Paso Panaloya	Bicarbonatada sódica clorurada
11	PM1- LXA	Bicarbonatada sódica
12	PM1- RTA	Bicarbonatada cálcica
13	PM3- RT	Clorurada sódica

Los MP – Estero El Caballo (9) y MP- Pasa Panaloya (10) localizados sobre la marcha del Río Tipitapa interceptan aguas del tipo Bicarbonatadas Sódicas con tendencia a tipo Cloruradas. En el diagrama se observa la escala proporcional a sólidos totales disueltos, los cuales registran valores de 1805 ppm (Tabla 11, código 10) y 6615 ppm (Tabla 11 código 9). En el reconocimiento de campo se observó que en el área de Paso Panaloya los niveles someros de agua interceptan las letrinas de los comunitarios, los corrales de la crianza bovina y porcina y del cementerio de la comunidad Paso Panaloya. El desarrollo de tales actividades constituye una fuente de carga contaminante para las aguas subterráneas. Referente al punto MP – Estero El Caballo, la mala calidad del agua obedece probablemente a las bajas permeabilidades del terreno y del tipo de material arcillosa que predomina en la zona pantanosa.

Los MP Yadira Rocha (1), El Hatillo (3), Margarito Castillo (4), Hacienda San Pedro (6), corresponden a aguas del tipo Cloruradas cálcicas (1), Bicarbonatadas sódicas (3, 4,) a Bicarbonatadas sódicas sulfatadas (6), este último tipo corresponde agua de descarga regional pero la abundancia de sulfato es anómala, originada probablemente por contaminación antropogénica, porque en las costas del Lago Cocibolca se desarrolla a pequeña escala la agricultura familiar.

En los piezómetros localizados en la salida del Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca se registran aguas del tipo Bicarbonatadas Sódicas Cálcicas a Bicarbonatadas Cálcicas correspondientes a aguas de recarga local, pertenecientes al acuífero de Tisma – Malacatoya.

El Piezómetro PM3- RT ubicado sobre el sistema de Falla Cofradía corresponde al tipo de agua Clorurada Sódica, característica de aguas muy mineralizadas influenciadas por la actividad termal.

IX.3.2.3. Relación Química agua Superficial Agua Subterránea

Para determinar la relación química entre los sitios muestreados, se grafican todas las muestras de agua analizadas en un único diagrama de Piper. Figura 34., esta herramienta permite analizar procesos anómalos que pueden cambiar la calidad de agua esperada en un terreno como el de la zona de interlagos y bajo las condiciones de este estudio se observa que el flujo profundo de los acuíferos es influenciado por la actividad hidrotermal, afectando significativamente la calidad de al agua, sobre todo en el área de Tisma, Termales Tipitapa y costa del Lago Cocibolca, cercano al área de El Hatillo.

A nivel subsuperficial el río Tipitapa, que transporta las aguas contaminadas del Lago Xolotlán tiene influencia en los tramos a partir del área de Hato Grande hasta la desembocadura en el Lago Cocibolca, es decir se observó una evidencia clara entre las aguas del río Tipitapa y el flujo subsuperficial. Las actividades antropogénicas también tienen influencia significativa sobre el flujo de descarga en el área de Paso Panaloya, Hacienda San Pedro y cerca de la desembocadura del Río Malacatoya al Lago Cocibolca.

Por otro lado, el carácter hidroquímico de los pozos perforados donde prevalece la naturaleza Clorurada Sódica, deben su origen al termalismo en el área.

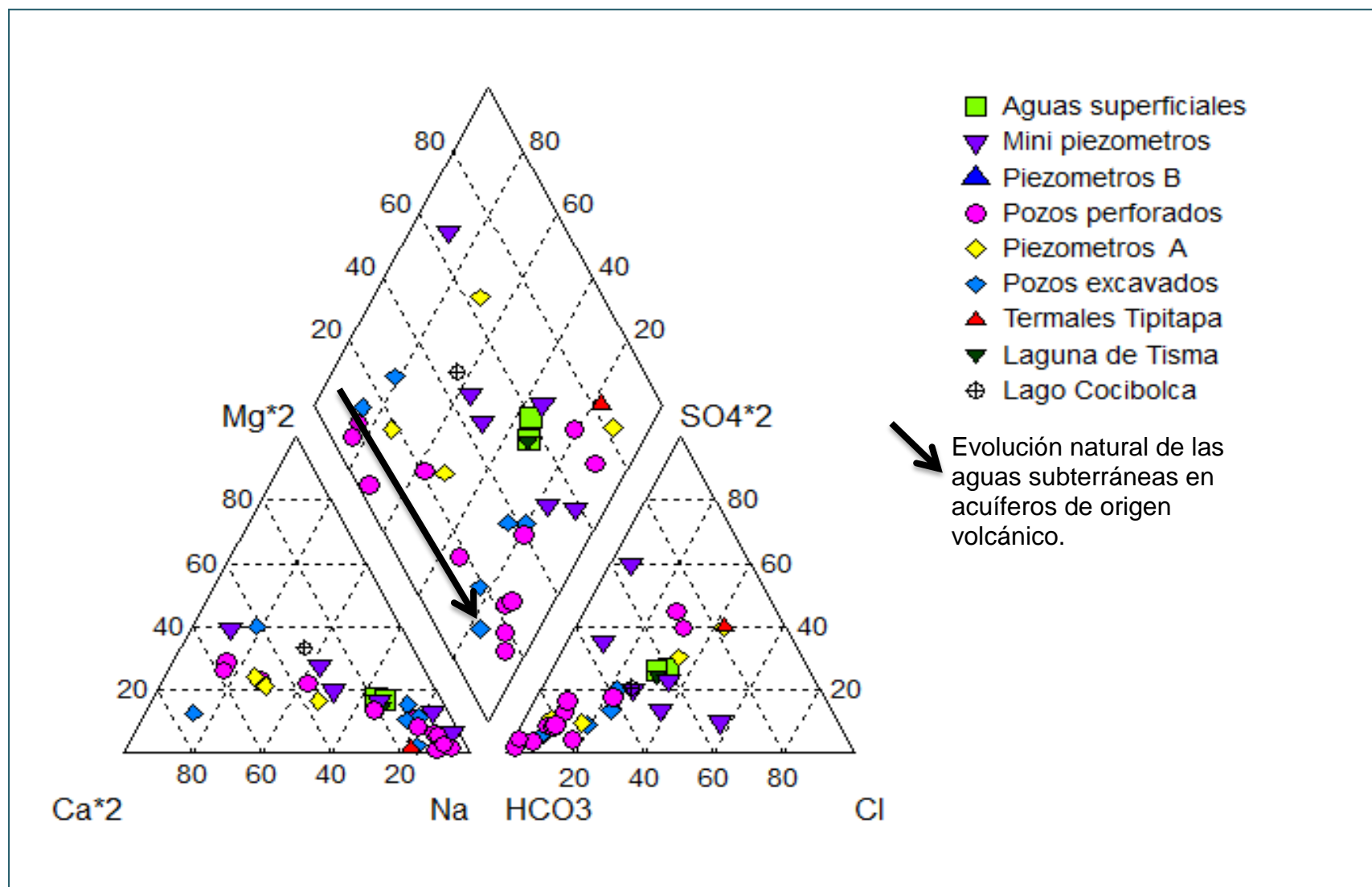


Figura 34. Tipo Hidroquímico de fuentes hídricas.

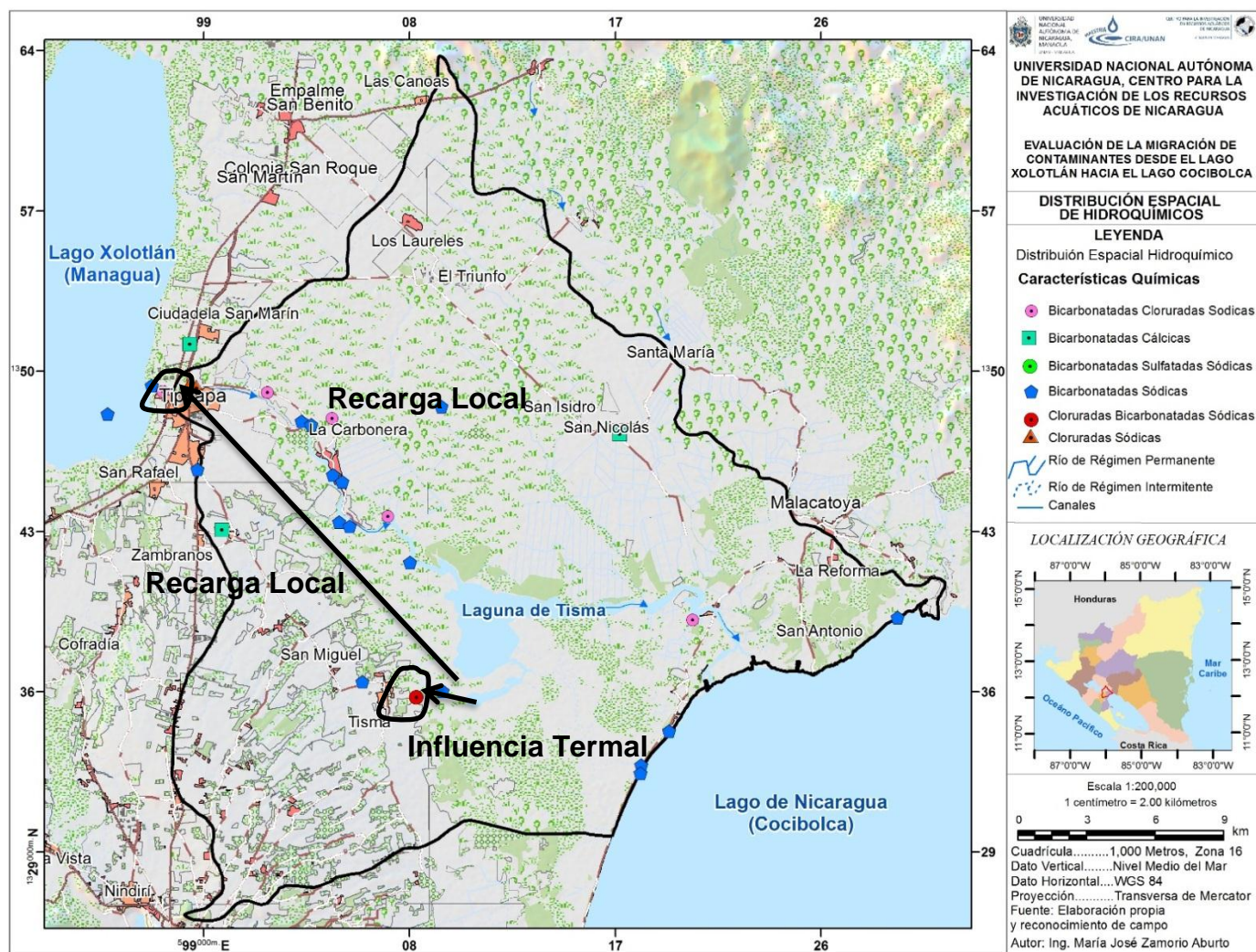


Figura 35. Distribución del tipo hidroquímico de aguas superficiales y subterráneas de la zona interlagos.

Para diferenciar entre flujos locales, intermedios y regionales, Mifflin en el año 1998 desarrollo una metodología basada en los órdenes de magnitud de los indicadores hidrogeoquímicos $\text{Na}^+ \text{K}$ y $\text{Cl} + \text{SO}_4$. La Figura 36 muestra tres grandes grupos: resalta el flujo local, del acuífero Tipitapa Malacatoya, en ellos no se observa la influencia de una recarga del Lago Xolotlán. El segundo grupo se refiere a aguas de mayor recorrido, más maduras del acuífero Las Sierras. Finalmente se observa un grupo muy distante al resto de fuentes hídricas. Este grupo es anómalo y la calidad del agua es producto de la contaminación antropogénica y muy mineralizadas por la actividad termal. En este tercer grupo se ubican los Mini piezómetros Paso Panaloya, Estero El Caballo Hacienda San Pedro y Los Terales de Tipitapa.

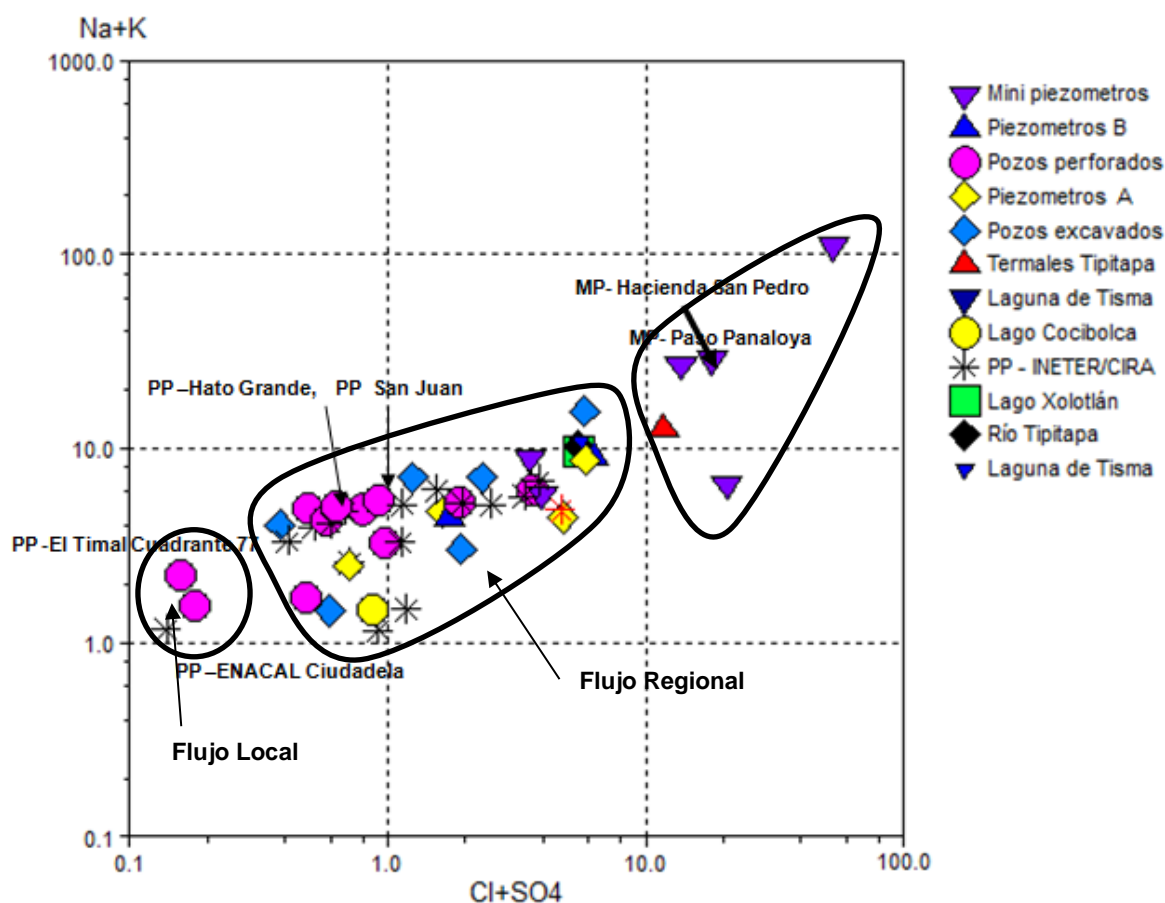


Figura 36. Relación entre mili equivalentes de $\text{Cl} + \text{SO}_4$ y $\text{Na} + \text{K}$.

IX.3.3.Evolución Hidroquímica

Para entender la evolución hidroquímica de las aguas subterráneas, existen una serie de herramientas entre las que resaltan los índices iónicos. Las relaciones iónicas ayudan a identificar los procesos en la trayectoria de las aguas subterránea. La relación se expresa en meqL^{-1} (r).

Relación $\text{HCO}_3^- / \text{Cl}^-$: índices menores de 1 corresponde a aguas más evolucionadas, índices mayores de 10 corresponden a aguas más jóvenes de menor recorrido o aguas de reciente infiltración. Para estudiar el índice o entender los procesos, se analizaron los tres grandes grupos: aguas superficiales, aguas subterráneas y piezómetros.

Aguas superficiales: de los lagos Xolotlán y Cocibolca, Tisma y Río Tipitapa.

Los índices presentan un rango entre 1.2 a 2.4, debido a que los lagos representan las descargas de aguas subterráneas evolucionadas, de recorrido significativo.

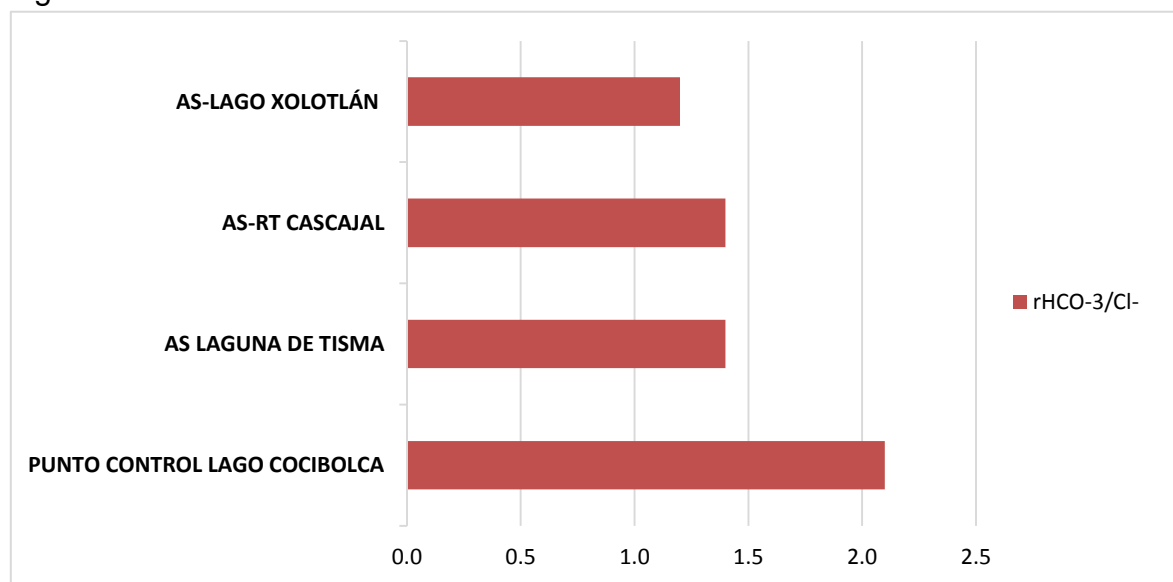


Figura 37. Relación iónica $\text{HCO}_3^- / \text{Cl}^-$ para aguas superficiales.

Mini piezómetros y Piezómetros: En los mini piezómetros el índice vario de 5, 6 a 0.6. En los MP –Hacienda San Pedro (5,6) y MP – Margarito Castillo (5,3), indicando que son aguas menos maduras, de menor recorrido o mezcladas con aguas de recarga local. Esto descarta los flujos profundos, la salinidad determinada se asocia a factores tales como la evaporación, contaminación de origen antropogénica y las bajas permeabilidades del terreno. Figura 38.

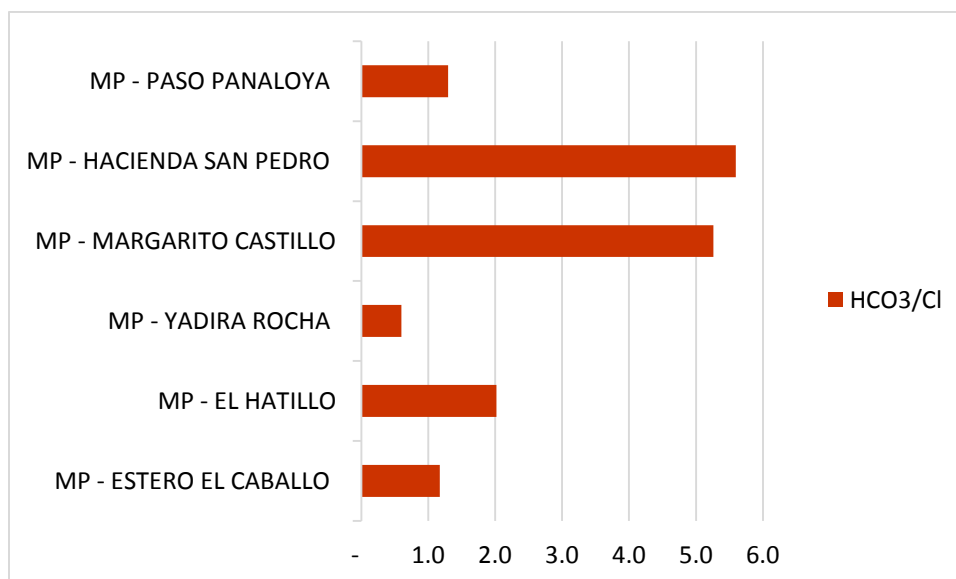


Figura 38. Relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ para Piezómetros y Min piezómetros.

El piezómetro PM1- RTA intercepta aguas de poco recorrido, o recarga local, provenientes del acuífero Tipitapa – Malacatoya. Los piezómetros PM2 – RTA ubicados en el bloque Sur del Lago Xolotlán tienen valores de 1.0 y 1.2, característicos de aguas más evolucionadas y maduras. Se observa que a pesar de ubicarse a pocos metros de distancia, las características químicas del agua son diferentes, lo cual indica diferentes acuíferos, regidos por diferentes procesos y que bajo las condiciones de este estudio ambas formaciones son independientes, hasta su descarga en el Lago Xolotlán, Figura 39.

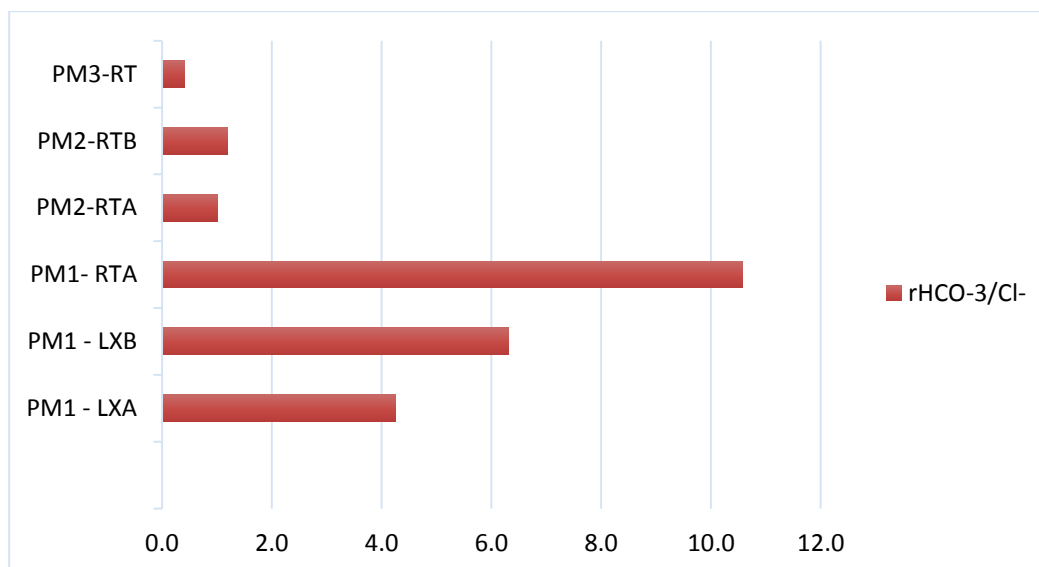


Figura 39. Relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ para Piezómetros.

Aguas subterráneas: La relación iónica para los pozos excavados muestra aguas con diferente génesis, los puntos PE – Rosa Hurtado (10.2) y PE – Tisma (11.9) son alimentados por recarga local. Figura 40.

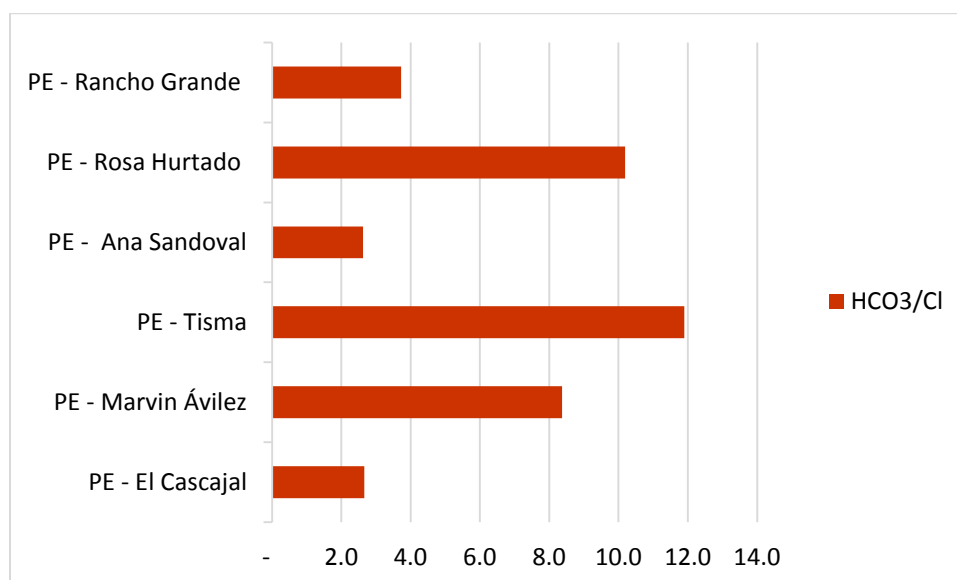


Figura 40. Relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ para Pozos Excavados

La relación iónica para los pozos perforados señala tres grupos: aguas jóvenes, recarga reciente y de poco recorrido (El Timal Cuadrante 77 y PP Enacal Ciudadela #1) los índices son de 57, 9 a 47, 3 respectivamente. Un segundo grupo presenta condiciones de mayor recorrido o de zonas de mezcla (PP – El Náutico, PP- Enacal Las Majadas, PP – Hacienda La Chiripa, PP- San Juan). El índice para este grupo varía de 14, a 7,2. Finalmente se observa un tercer grupo de aguas de descarga regional de mayor recorrido (Centro Recreativo Tisma, PP – Sistema de Agua Potable Lo Ideal y PP – El Timal Cuadrante 85). Estas pueden ser consideradas aguas de recarga regional, el índice para este grupo va de 2.7 a 0.9. Figura 41.

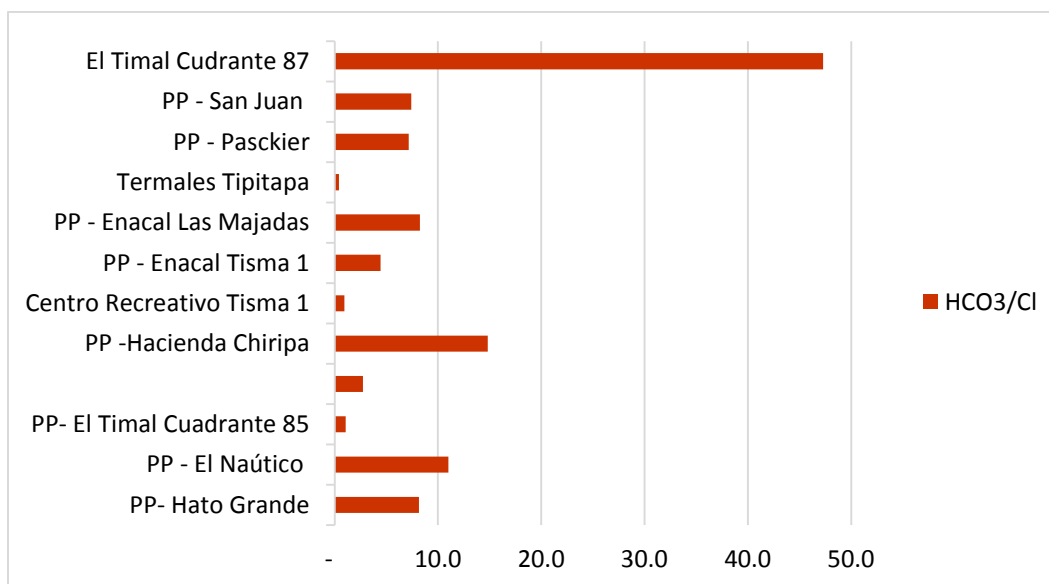


Figura 41. Relación iónica HCO₃/Cl⁻ para pozos perforados.

Índice de Intercambio de Bases.

El índice de desequilibrio entre cloruros y alcalinos o índice de cambio de bases (icb) es una herramienta utilizada para estudiar los procesos de intercambio de bases en los acuíferos. Para aplicar este índice se asume que los iones Cl⁻ y Na⁺ son dominantes:

$$r_{Cl} = \frac{r_{Cl} - r(Na + K)}{r(SO_4 + CO_3H + NO_3)}$$

Custodio Señala que el **icb** en aguas subterráneas suele tomar valores positivos o negativos, en general próximos a 0. Si existe ablandamiento (cambio de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ por Na⁺) su valor tiene a disminuir y si ocurre endurecimiento el valor tiende a crecer. La desaparición del Mg⁺⁺ en las aguas subterráneas puede conferir agresividad del agua, originando cambios en las concentraciones de bicarbonato y carbonato. Generalmente las aguas ablandadas tienen a aumentar su pH.

A excepción de la muestra de agua subterránea tomada en el MP El Hatillo (1.03) los índices icb fueron negativos, decreciendo significativamente en relación al 0, predominando los procesos de ablandamiento, es decir el intercambio de bases, el agua va cediendo iones de Calcio y Magnesio y va adquiriendo Sodio.

Para entender la interacción entre el río y el acuífero del entorno se trazó un transecto hidroquímico desde el lago Xolotlán hasta el lago Cocibolca. El Lago con

tipo hidroquímico Bicarbonatado Sódica, contiene concentraciones significativas de sales. Los puntos considerados para el transepto son: PM1- LXA, PP- San Juan, Río Tipitapa, PE – El Cascajal, Laguna de Tisma, MP – Paso Panaloya, PP – Lo Ideal El Hatillo, MP – El Hatillo, Lago Cocibolca. Tal como se aprecia en los diagramas de Stiff, el Lago Xolotlán no tiene incidencia sobre el piezómetro PM1-LXA. Luego siguiendo el recorrido del Río, se observa que el Río no está conectado con el acuífero profundo. Se observa una interacción con el flujo subsuperficial, el cual puede detectarse en la calidad de agua del pozo excavado PE – El Cascajal y el MP – Paso Panaloya. Figuras 42 y 43.

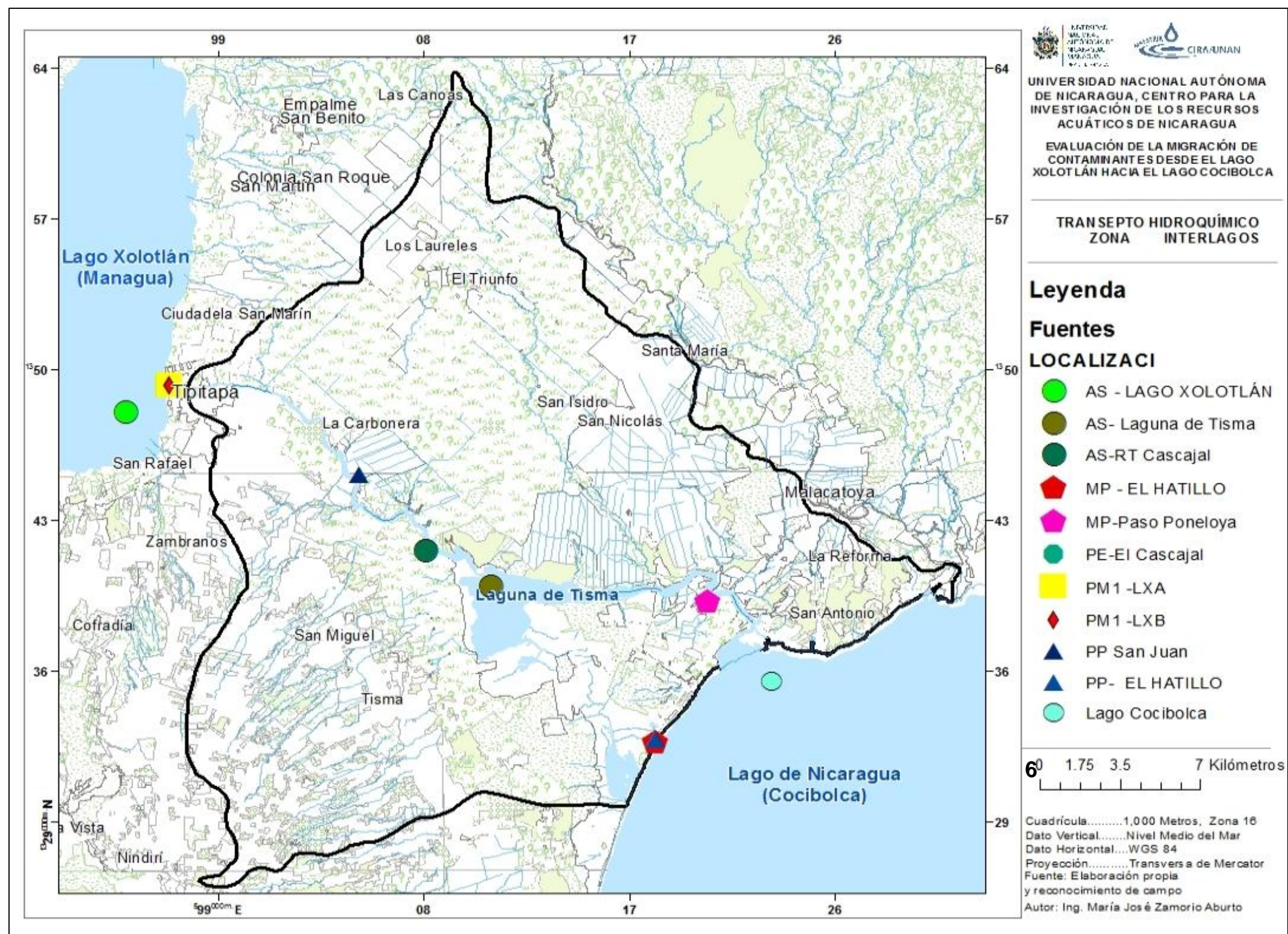


Figura 42. Transepto hidroquímico entre el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca

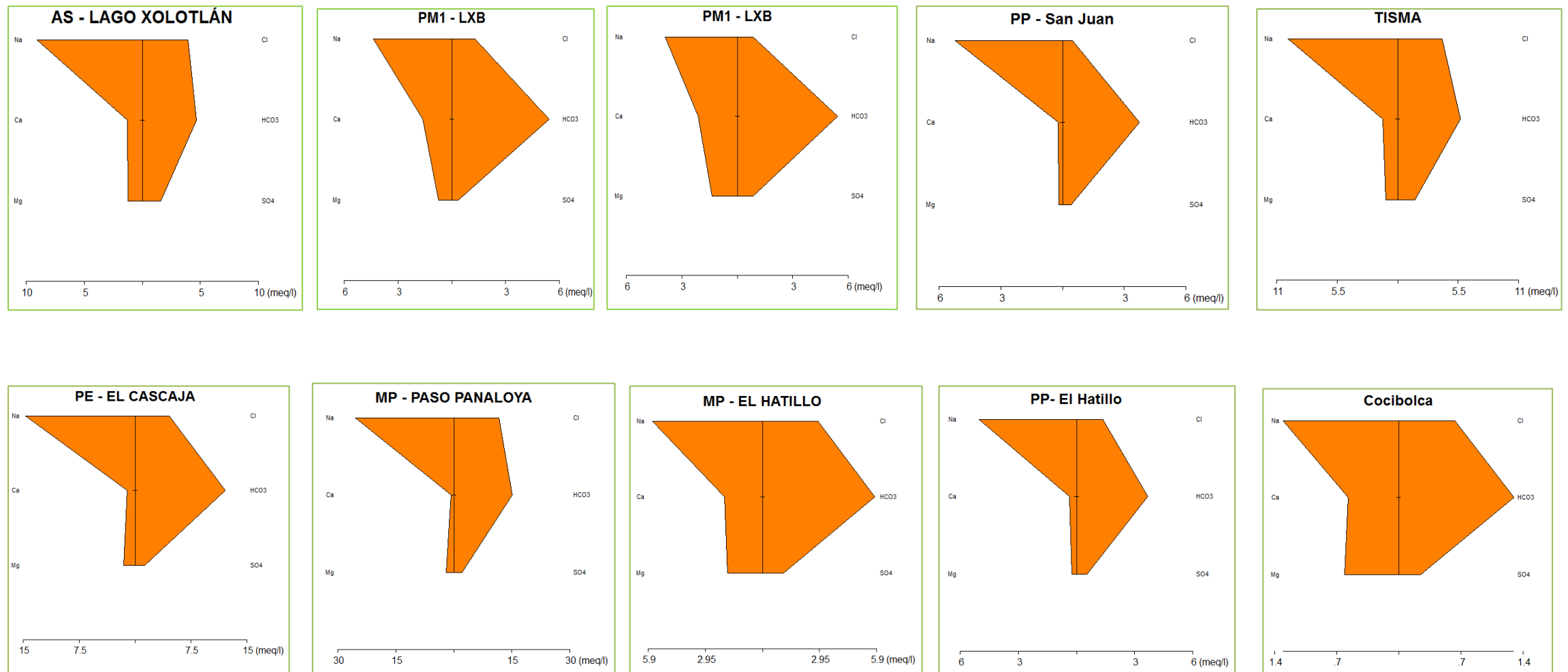


Figura 43. Diagramas de Stiff de acuerdo al tipo hidroquímico del agua muestreada.

IX.4. Caracterización Isotópica

El uso de los isótopos estables del agua $\delta^2\text{H}_{\text{water}}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ es para determinar si el Lago Xolotlán recarga o ejerce influencia sobre las aguas subterráneas en el área interlagos, de la cuenca Tisma – Malacatoya. El Lago Xolotlán tiene una huella (fingerprint) particular, que puede ser reconocido en las muestras de aguas subterráneas analizadas. En este estudio se analizó muestras provenientes de los lagos, Río Tipitapa, Laguna de Tisma, pozos perforados, pozos excavados, manantiales y aguas de precipitación, los resultados se analizan a continuación:

Isotopía Lago Xolotlán

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) estudiaron en el año 1998 la composición isotópica promedio de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del Lago. Tales datos son retomados en esta tesis para compararse con el muestreo realizado en esta investigación.

La Tabla 12 expone el comportamiento isotópico del Lago en los últimos 20 años. Se observa una tendencia al empobrecimiento de isótopos del año 1997 a 1999, originado probablemente por el aporte de aguas subterráneas y la escorrentía superficial del entorno, aumentadas por el aporte del Huracán Mitch. En el muestreo realizado en este estudio, se determinó una composición isotópica más enriquecida de isótopos en comparación al año 1999, debido al menor aporte superficial y subterráneo sobre la evaporación del Lago.

Tabla 12. Composición Isotópica del lago Xolotlán

* Mayo 1997	* Noviembre 1997	**Diciembre 1999	Noviembre 2011
$\delta^{18}\text{O} = -0.08 \pm 0.09\text{‰}$	$-0.24 \pm 0.04\text{‰}$	$-2.09 \pm 0.1\text{‰}$	$-1.8 \pm 0.1\text{‰}$
$\delta^2\text{H} = -4.7 \pm 1.1\text{‰}$	$-5.8 \pm 1.1\text{‰}$	$-16.2 \pm 1.5\text{‰}$	$-13.0 \pm 1.0\text{‰}$

*. Rozanski (1999)

** Plata (199).

Isotopía del Río Tipitapa y Laguna de Tisma:

El Río Tipitapa y la Laguna de Tisma, comparten la misma composición isotópica del Lago Xolotlán. Si consideramos que es una zona de descarga de dos acuíferos, se esperaría un contenido más empobrecido en relación al lago. De esta manera, tanto el Río como la Laguna de Tisma son sitios de descarga

regional de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras y del Acuífero de Malacatoya. Sin embargo, los resultados indican que el aporte del Lago Xolotlán es significativo, prevaleciendo la composición isotópica de este en las aguas superficiales del Río y la Laguna.

Tabla 13. Composición Isotópica de Aguas Superficiales

Ubicación	Muestra	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$	T_{water}
Lago Xolotlán	Bthune-AS-LX	-1.8	-13.0
Muestra Río Tipitapa 1	Bthune-AS-RT1	-2.1	-15.4
Rio en el Cascajal	Bthune-AS-RTCJAL	-2.0	-15.5
Laguna de Tisma	Bthune-AS-LT	-2.0	-13.8

Mini piezómetros:

Los resultados de los Mini piezómetros instalados en las riberas y la desembocadura del Río Tipitapa al Lago Cocibolca del Río Tipitapa, se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Composición Isotópica de Mini Piezómetros.

Ubicación	SAMPLE ID	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{water}}$
MP - El Quemado	Bthune-MP-EQ	-5.7	-39.1
MP - Después de Hato Grande	Bthune-MP-DHG	-4.0	-30.2
MP - Estero El Caballo	Bthune-MP-EC	-3.6	-27.5
MP - Cascajal 1	Bthune-MP-CJAL 1	-4.1	-27.3
MP - Cascajal 2	Bthune-MP-CJAL 2	-3.9	-28.3
MP - Paso Panaloya	Bthune-MP-PP	-3.8	-24.7
MP - El Hatillo	Bthune-MP-EH	-1.8	-13.1
MP - Malacatoya Santa Elisa	Bthune-MP-SE	-3.2	-24.4
MP- Hacienda San Pedro	Bthune-MP-SP	-2.3	-15.8
MP - Yadira Rocha	Bthune-MP-YR	-0.7	-5.1

Los resultados de las muestras de los mini piezómetros MP – EQ, MP-DHG, MP-EC, MP CJAL1 y MP CJAL 2 instalados en las riberas del Río Tipitapa muestran valores empobrecidos (-5, 7 a -3,9) en relación al contenido isotópico del Lago Xolotlán, pero más enriquecidos en relación al acuífero. Esta concentración isotópica en particular indica una mezcla entre las aguas enriquecidas del Río Tipitapa y las aguas empobrecidas del Acuífero Las Sierras sector Oriental y el Acuífero de Malacatoya - Tipitapa.

Pozos perforados

En la tabla 15 se muestran los resultados para pozos perforados, sus aguas son empobrecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Parte de los pozos perforados pertenecen al acuífero Regional Las Sierras. El estudio realizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica en el año 1992, concluyó que la recarga para el acuífero ocurre en las cotas superiores a los 600m. Se señala que la sección norte de la zona oriental del acuífero (área de estudio, parte de la zona interlagos), es enriquecida, en 1‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y 10 ‰ de $\delta^2\text{H}$, por lo que puede ocurrir recarga local. Además, este sector en particular está expuesto a efectos geotermales que pueden modificar la composición isotópica.

Tabla 15. Composición Isotópica de los Pozos Perforados

Ubicación	SAMPLE ID	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{water}}$
Pozo Surgente Tisma	Bthune-PS-T	-6.1	-39.7
PP - El Timal Cuadrante 195	Bthune-PP-TC195	-5.9	-40.3
PP - San Nicolás	Bthune-PP-SN	-6.1	-41.1
PP- San Juan	Bthune-PP-SJ	-5.4	-36.6
PP –Pasckier	Bthune-PP-PCP	-6.3	-43.1
PP - Hato Grande	Bthune-PP-HG	-5.2	-37.2
Pozo Perforado Enacal Tipitapa	Bthune-PP-ETP	-6.2	-41.9
Pozo Perforado El Timal - Cuadrante 85	Bthune-PP-ET85	-6.2	-43.4
Pozo Enacal Tisma	Bthune-PP-ET	-5.9	-39.0
PP- El Quemado	Bthune-PP-EQ	-5.9	-40.4
Pozo Perforado La Majada	Bthune-PP-ELM	-5.4	-39.0
Sistema de Agua Potable Lo ideal - El Hatillo	Bthune-PP-EHLI	-6.5	-45.4
Centro Recreativo Tisma 2	Bthune-PP-CRT2	-6.0	-39.8
Centro Recreativo Tisma 1	Bthune-PP-CRT1	-6.3	-41.8
Centro Recreativo El Náutico	Bthune-PP-CRN	-6.2	-41.9

A pesar de este leve enriquecimiento, no se visualiza conexión con el lago Xolotlán, con valores enriquecidos de isótopos, con el acuífero Las Sierras. Además, se observó la recarga local del sector Norte del acuífero Las Sierras a partir de los 50 m.s.n.m.

Pozos excavados:

Se tomaron muestras de tres pozos excavados. Al igual que los pozos perforados, sus aguas presentan un empobrecimiento isotópico, no se observa una clara

evidencia que apunte la influencia de las aguas contaminadas del lago Xolotlán sobre el acuífero Las Sierras y Tipitapa Malacatoya (Tabla 16).

Tabla 16. Composición Isotópica de los Pozos Excavados

Ubicación	SAMPLE ID	$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{water}}$
Rosa García	Bthune-PE-ROG	-5.8	-40.0
Ana Sandoval	Bthune-PE-AS	-6.2	-39.4
PE - Rancho Grande	Bthune-PE-RG	-6.2	-41.4

IX.4.1. Comparación de la caracterización Isotópica

Para analizar los contenidos de isótopos en las muestras de agua, es necesario construir la línea meteórica local, no obstante, para nuestro país y para la zona de estudio no se cuenta con suficientes datos para su construcción. Para efectos de esta tesis se utilizó los datos de la línea meteórica de la Laguna de Apoyo (Calderón y Flores, 2010) por ser una de las zonas más cercanas a la zona de interlagos y de la línea meteórica mundial. Figura 44

En la Figura 44 se muestran los resultados obtenidos de la composición isotópica de los diferentes cuerpos de agua y se observa la formación de tres grupos. El primero corresponde a muestras enriquecidas, en el cual se ubican los lagos Xolotlán y Cocibolca, la laguna de Tisma, el Río Tipitapa y dos mini piezómetros ubicados en las costas del lago Cocibolca. Referente a la huella isotópica del Lago Xolotlán y del Cocibolca ambos poseen las mismas características tales como que ambos lagos son polimícticos, reciben aporte de aguas superficiales y subterráneas. Así mismo sufren evaporación por la extensa área de los espejos de agua.

El segundo grupo los constituyen aguas con valores empobrecidos, en el cual se ubican los pozos perforados. La rejilla de estos pozos se localiza entre los 40 y 100m, lo cual indica que el Lago Xolotlán no contribuye a la recarga de los acuíferos adyacentes.

Finalmente se observó la formación del grupo de mezcla de aguas empobrecidas y enriquecidas, en el cual se ubican los mini piezómetros del área entre Cascajal y Paso Panaloya, a lo largo del cauce del río Tipitapa.

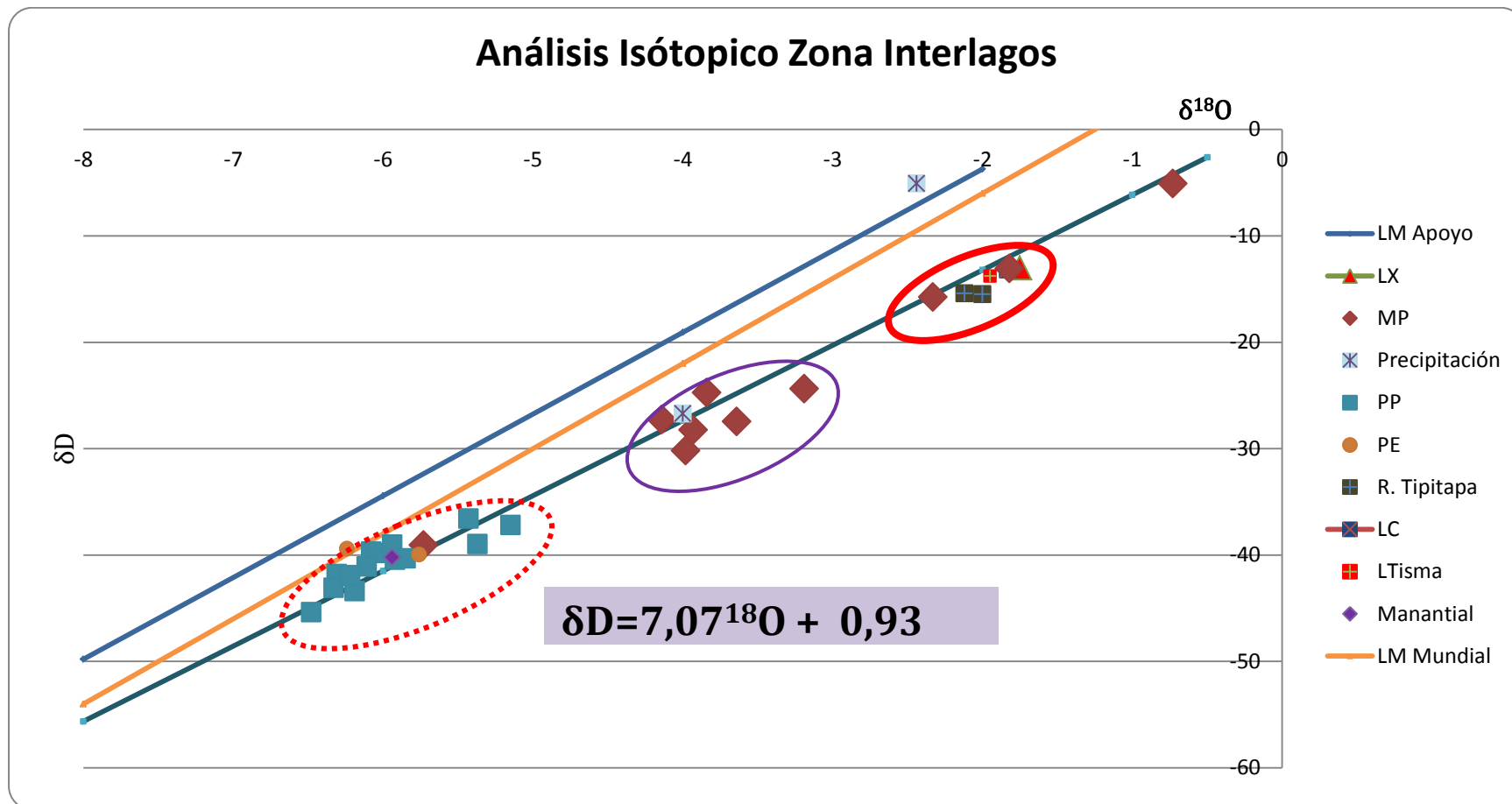


Figura 44. Análisis del Contenido de Isótopos Estables en la Zona Interlagos en relación a la Línea Meteorica Mundial.

El contenido isotópico en las aguas de los dos mini piezómetros ubicados en los sedimentos de la costa del Lago Cocibolca, tienen la misma huella del Lago, indicando que sufren un proceso de evaporación.

La composición isotópica de las aguas de seis mini piezómetros instalados en las riberas del río Tipitapa, señala mezcla tanto de aguas superficiales y subterráneas, indicando la interacción entre el río Tipitapa y las aguas subterráneas, dando lugar a la formación de una zona hiporreica, definida como una zona de transición situada por debajo de los cauces de los ríos en la que convergen y se producen intercambios entre las aguas superficiales y subterráneas.

La piezometría de la cuenca de estudio indica que el Río Tipitapa y la Laguna de Tisma son áreas de descarga Regional, se esperaría que el contenido de isótopos resulte en una mezcla de aguas subterráneas provenientes de las partes más altas pobremente enriquecidas con aguas muy evaporadas del lago Xolotlán. Sin embargo, bajo este estudio los resultados indican prevalencia de aporte del Lago.

La muestra de agua tomadas del único manantial muestreado tiene la misma huella isotópica que las aguas de los pozos perforados y los pozos excavados. La concentración de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ es empobrecida. Los manantiales son una importante fuente de información hidrogeológica. Estos se originan cuando la carga hidráulica del sistema acuífero intercepta la superficie del terreno. Este manantial representa la descarga del acuífero regional Las Sierras, ubicado en las coordenadas 1347519 N, 603695 E.

En la Figura 45 se muestra la distribución espacial de contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en las muestras de aguas superficiales y subterráneas. Se observa claramente un alto enriquecimiento en isótopos pesados en las muestras de los lagos Xolotlán y Cocibolca, e igual comportamiento presenta las muestras tomadas en el río Tipitapa y laguna de Tisma.

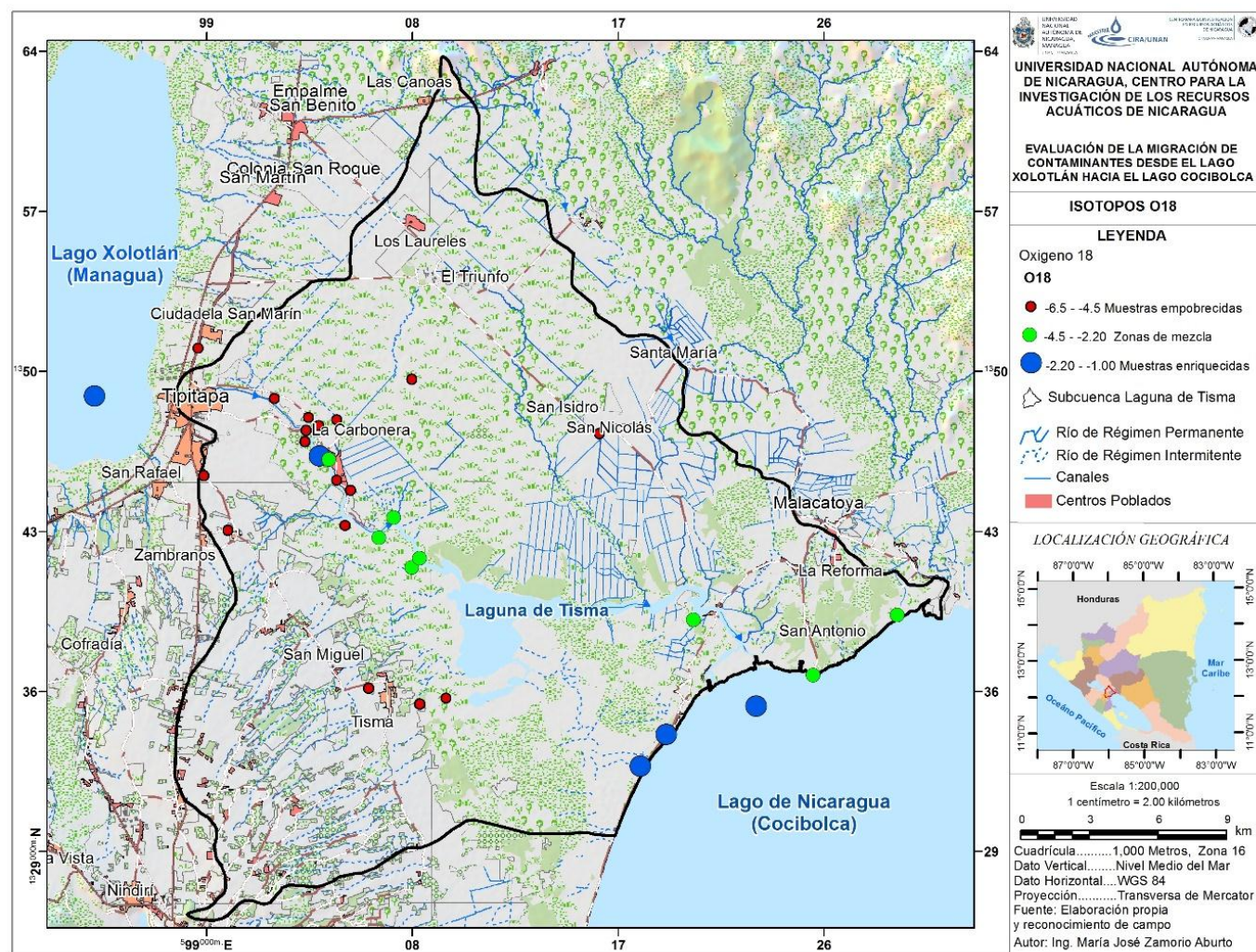


Figura 45. Contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en muestras tomadas en la zona interlagos.

Referente a la interacción que puede existir entre el Río Tipitapa y el acuífero adyacente se observa zona de mezcla en muestras tomadas en los mini piezómetros, y tal como se mencionó en los párrafos anteriores se forma una zona hiporreica.

Relacionando las altas conductividades eléctricas medidas en los mini piezómetros MP – El Hatillo (904 uS/cm), MP – Hacienda San Pedro (3180 uS/cm), MP y Malacatoya Santa Elia (1171 uS/cm) y los valores enriquecidos de isótopos, ubicados en las zonas de descarga regional, se atribuyen a procesos de evaporación. Diferentes autores manifiestan que cuando ocurren cambios isotópicos del agua con incrementos importantes en la salinidad suelen ser debidos a un simple proceso de evaporación, por el contrario, si se observa cambios en la salinidad pero no en los contenidos isotópicos, la salinidad se origina por procesos de la disolución de la matriz del acuífero catalizada por las actividades hidrotermales del área, por tanto se concluye que la salinidad detectada en estas muestras se origina por la evaporación.

Otra causa que incide en los aumentos en la salinidad lo constituye la contaminación orgánica originada por las actividades domésticas o agrícolas. En el punto PE – AS fueron detectada un valor de conductividad 1428 uS/cm.

X. Dinámica de la migración de sustancias desde el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca.

En esta sección se analiza los resultados de laboratorio obtenidos del muestreo de agua realizado en las diferentes fuentes (lagos, pozos perforados, PM, MP, pozos excavados) para determinar cómo es el comportamiento de algunos contaminantes y sustancias.

X.1. Cloruros

El ion cloruro por su carácter conservativo es utilizado como un trazador natural en los estudios de contaminación, la concentración en las aguas subterráneas proporciona un indicio de la influencia del Lago Xolotlán a las formaciones acuíferas adyacentes. Los cloruros también son excelentes indicadores para determinar la contaminación por actividades antropogénicas, suministrando información sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación y la presencia probable de patógenos. Otra fuente importante de cloruros, lo constituye las actividades hidrotermales. Las altas concentraciones no representan un riesgo para la salud humana.

X.1.1. Aguas superficiales:

En el muestreo realizado se detectó concentraciones de 139.7 mgL^{-1} en el Lago Xolotlán, las cuales provienen de fuentes antropogénicas (vertido de aguas residuales) y de fuentes naturales. En Tisma las concentraciones aumentan levemente (143.36 mgL^{-1}), en el Lago Cocibolca disminuye significativamente (22.37 mgL^{-1}). El comportamiento en las concentraciones de cloruro se observa que los Humedales de Tisma ejercen un poder depurador. Figura 46.

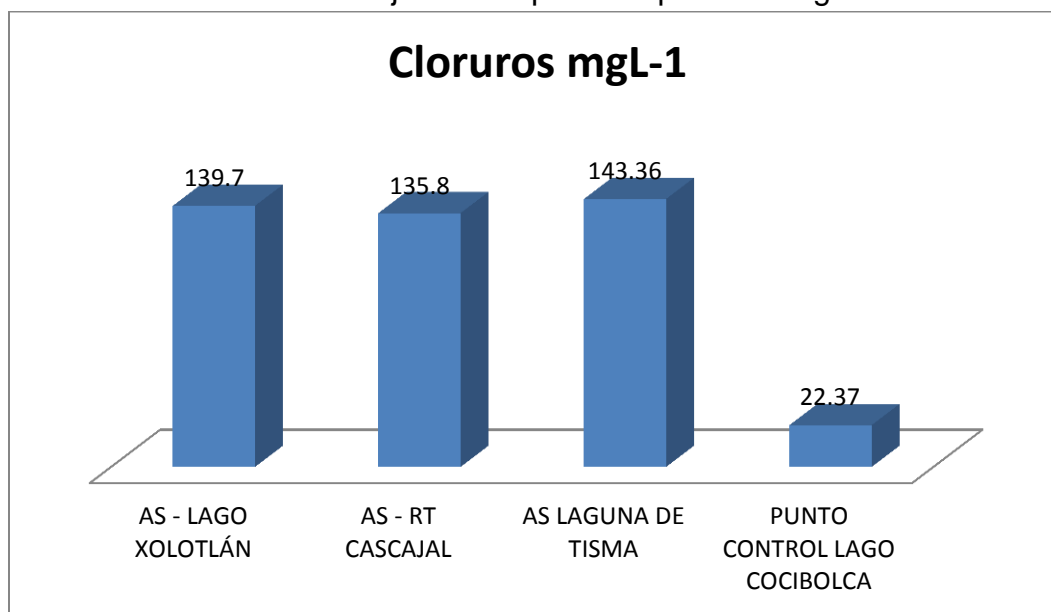


Figura 46. Concentración de cloruros en aguas superficiales.

X.1.2. Aguas subterráneas:

En los pozos perforados analizados las concentraciones de cloruro no sobrepasan los 100 mg/L . Aunque las altas concentraciones de cloruro no son un peligro para la salud de las personas, las Normas CAPRE recomiendan un valor de 25 mg L^{-1} y un valor máximo admisible de 250 mgL^{-1} . Las máximas concentraciones se detectaron en los puntos Centro Recreativo Tisma y el PP – El Timal, en estos puntos se detectó temperaturas superiores a 33°C , por ello las concentraciones de cloruro pueden asociarse a procesos termales que favorecen la liberación de las sales de cloruro del material geológico.

En los pozos excavados, la mayor concentración detectada fue en el pozo PE – El Cascajal (160.8 mgL^{-1}), el cual está ubicado cerca del Río Tipitapa, lo que indica una conexión hidrogeológica entra el acuífero local del área y el Río. Estos resultados coinciden con los datos recolectados de Conductividad Eléctrica en el reconocimiento de campo, los datos isotópicos y los datos del tipo hidroquímicos

del agua. A partir de esta área en particular existe una mezcla de las aguas del Río con las aguas subterráneas que descargan en la zona, confirmado también en los análisis del contenido isotópico(Ver figura 41), en estos MP se detectó contenidos isotópicos en un rango de $-3.6 \delta^{18}\text{O}$ y de $-27.5 \delta^2\text{H}$, esta huella isotópica es adquirida por la mezcla de aguas evaporadas del lago Xolotlán ($-1.8\delta^{18}\text{O}$, $-13.0, \delta^2\text{H}$) y aguas provenientes del acuífero Las Sierras ($-6.3 \delta^{18}\text{O}$, $-43.1 \delta^2\text{H}$).

En la figura 47 se muestra la distribución espacial de los cloruros en el área interlagos. Se observa que las altas concentraciones se localizan en las muestras de los pozos excavados cercanos del Río Tipitapa y los mini piezómetros localizados en las zonas de descarga en Lago Cocibolca. En los pozos perforados las concentraciones varían de 2.73 mgL^{-1} a 83 mgL^{-1} . No obstante en aquellos pozos perforados que se evidencia cierta actividad termal los Cloruros sobrepasan los 400 mgL^{-1} .

Si los cloruros de los pozos perforados y excavados provienen del lago Xolotlán, es de esperar valores enriquecidos de ^{18}O , no obstante, los pozos contienen valores empobrecidos, por ello se descarta la conexión del Xolotlán con el acuífero profundo (Figura 47). Por lo tanto, las concentraciones de cloruros son por aporte del material geológico por el que circulan las aguas subterráneas. Figura 48.

Para conocer la distribución y comportamiento de los cloruros a nivel superficial, subsuperficial y subterráneo, se realizó un perfil de cloruros, utilizando como base la información del perfil hidrogeológico elaborado por INETER (2010). En la figura 49 se observa que las máximas concentraciones de cloruros fueron detectadas a nivel subsuperficial. De este modo, se descarta la conexión hidrogeológica entre el Lago y las formaciones acuíferas profundas.

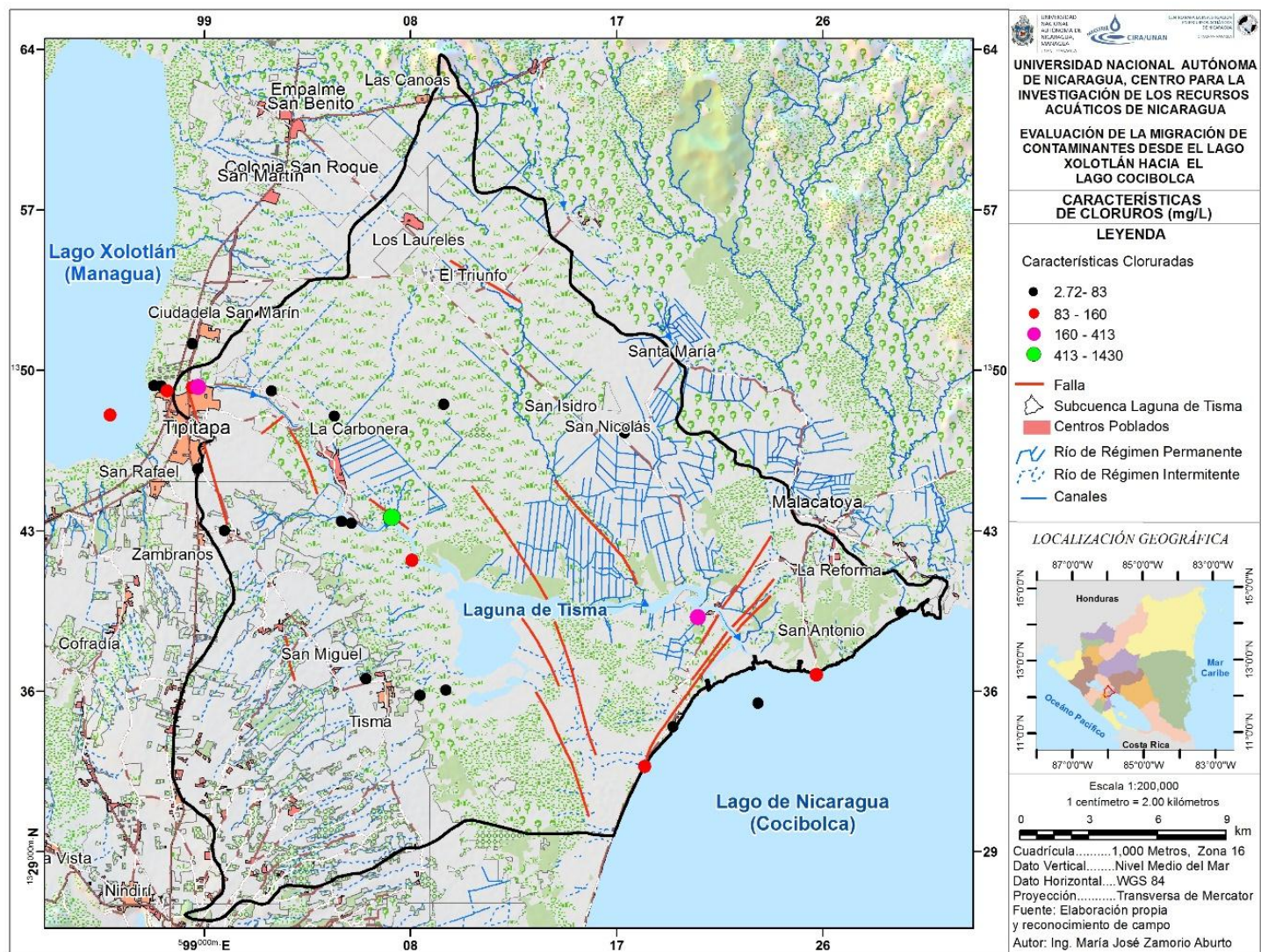


Figura 47. Distribución espacial de cloruros en la zona interlagos

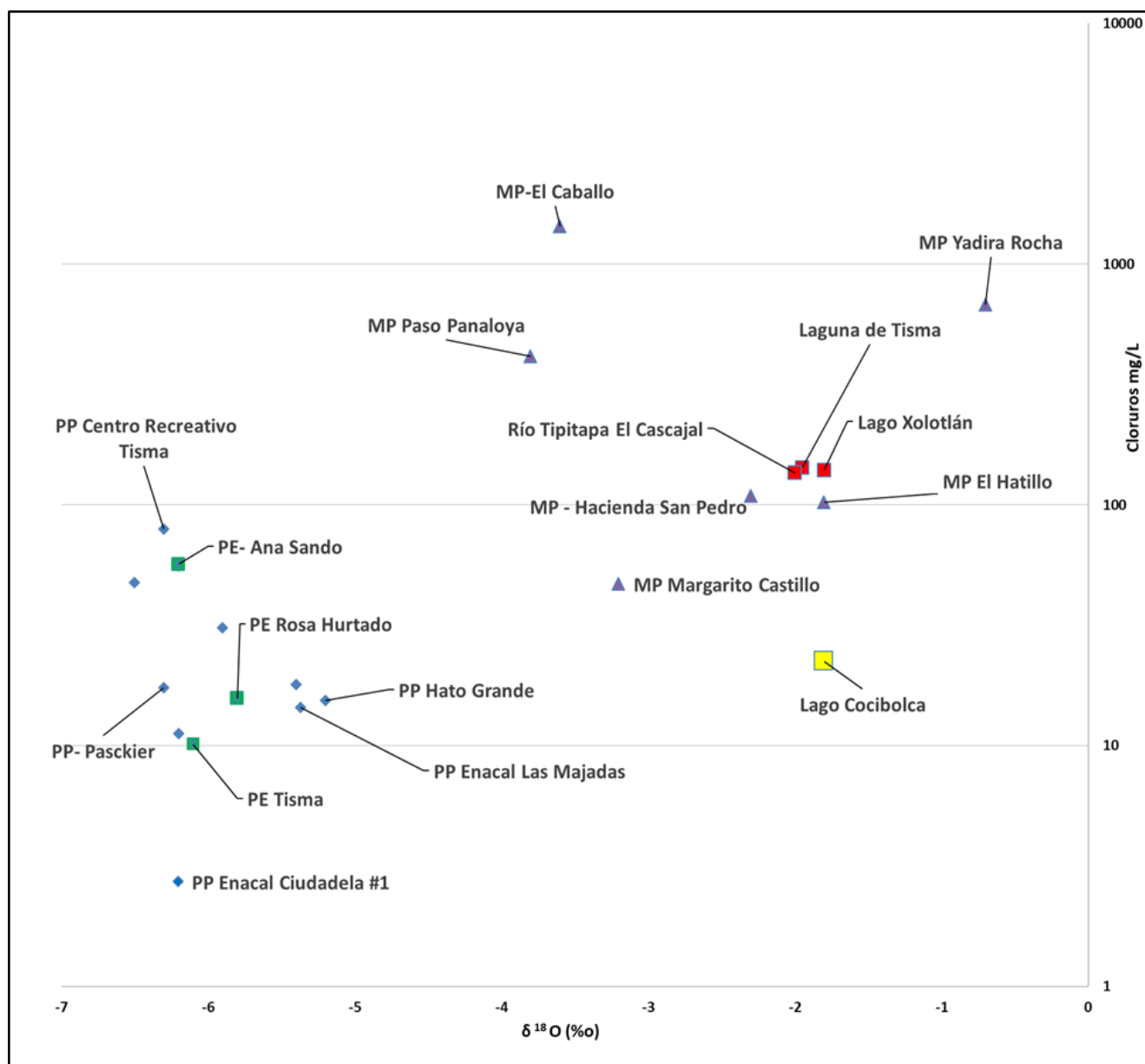


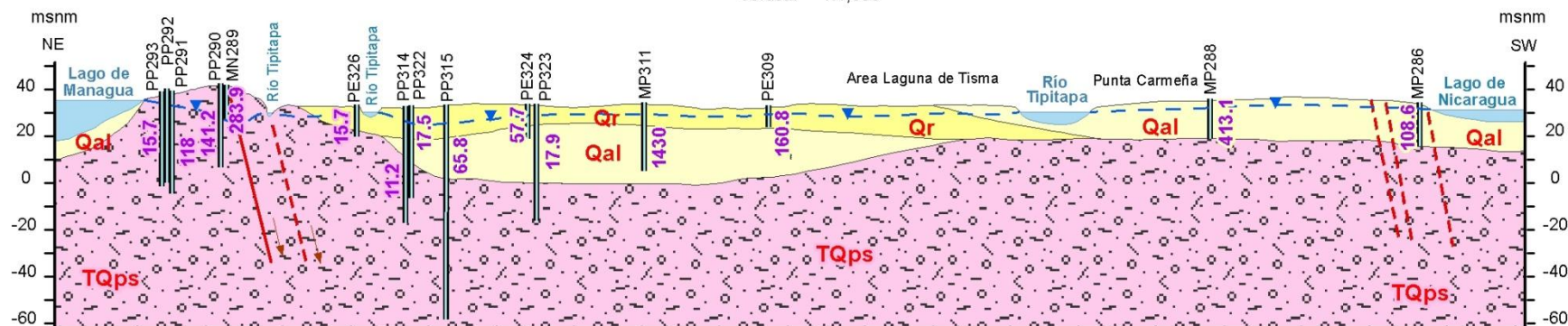
Figura 48. Relación de $\delta^{18}\text{O}$ y Cloruros en muestras colectadas.

CLORUROS EN SITIOS DE MUESTREO UBICADO EN EL TRNSEPTO DEL PERFIL HIDROGEOLÓGICO A-A'

CORTE LONGITUDINAL NE-SW

Escala Horizontal 1:50,000

Vertical 1:1,000



LEYENDA

Fornaciones Geológicas

- Qal Cuaternario aluvial (Qal)
- Qr Cuaternario residual (Qr)
- TQps Las Sierras (TQps)

--- Nivel Estático del Agua (msnm)

PP 323 Código de Objeto Hidrogeológico

17.9 Objeto hidrogeológico (PP: Pozo Perforado, PE: Pozo Excavado, MN: Manantial y MP: Minipiezometro) y Concentración de Cloruros en mg/l

- Falla
- Falla cubierta
- Buzamiento

Figura 49. Concentraciones de Cloruros, medidos en transepto del Perfil Hidrogeológico A - A tomado del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

X.2.Sulfatos

Las concentraciones de sulfato en aguas naturales pueden variar entre 2 a 150 mgL^{-1} , las altas concentraciones no representan un riesgo significativo para la biota. En el Lago Xolotlán se detectó una concentración de 75.71 mgL^{-1} . Se observa que a nivel superficial en Tisma se concentran las sustancias que están migrando a nivel superficial desde el Lago Xolotlán. Tal como muestra la Figura 50 las concentraciones en el lago Cocibolca disminuyen significativamente.

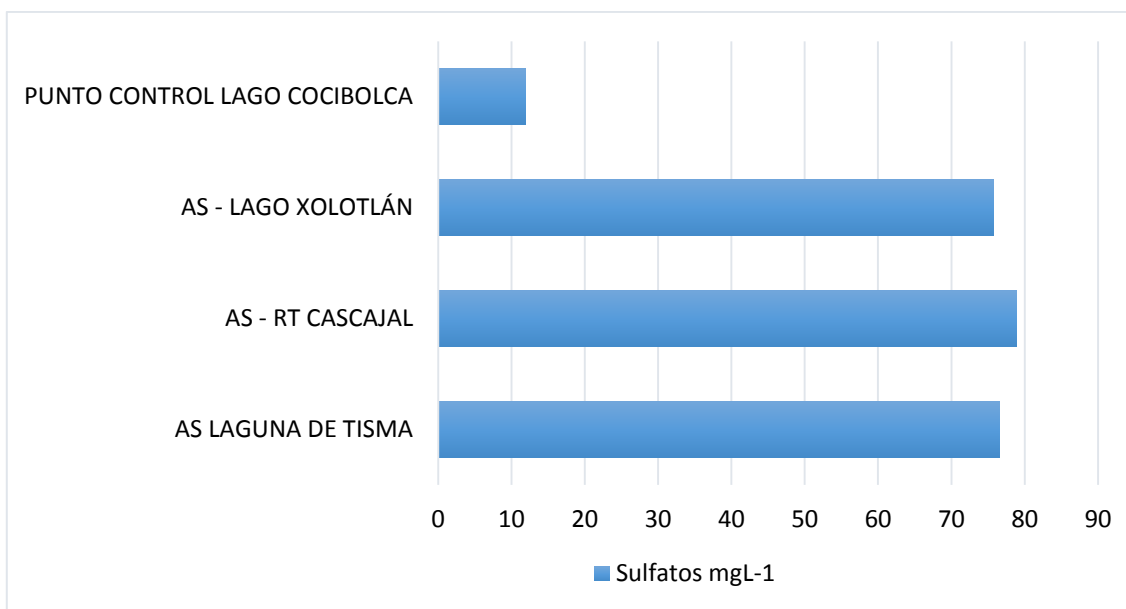


Figura 50. Concentración de Sulfatos en aguas superficiales.

La mayor concentración de sulfato se registra en los Termales Tipitapa. Las aguas termales contienen sulfuro de hidrógeno disuelto, el cual al entrar en contacto con el aire se oxida y forma sulfatos. En los pozos perforados PP – Centro Recreativo Tisma 1 y el PP- Timal Cuadrante 85 registran las mayores concentraciones. Estos altos valores también concuerdan también con las mayores temperaturas registradas. Sin embargo, esta concentración no sobrepasa el valor máximo admisible recomendado por las Normas CAPRE (250 mgL^{-1}) para que sean aptas para el consumo humano. El pozo excavado PE – El Cascajal registra la mayor concentración de sulfato (60.75 mgL^{-1}). A partir de esta zona en particular se identificó la formación de una zona hiporreica, la cual favorece el intercambio entre el flujo superficial y el flujo de descarga del acuífero Las Sierras. El pozo El Cascajal tiene una clara influencia de las aguas contaminadas del caudal proveniente del Lago Xolotlán y que viaja a través del Río Tipitapa. Las

concentraciones del Sulfato son producto de la interacción entre los sistemas superficiales y subterráneos. Figura 51.

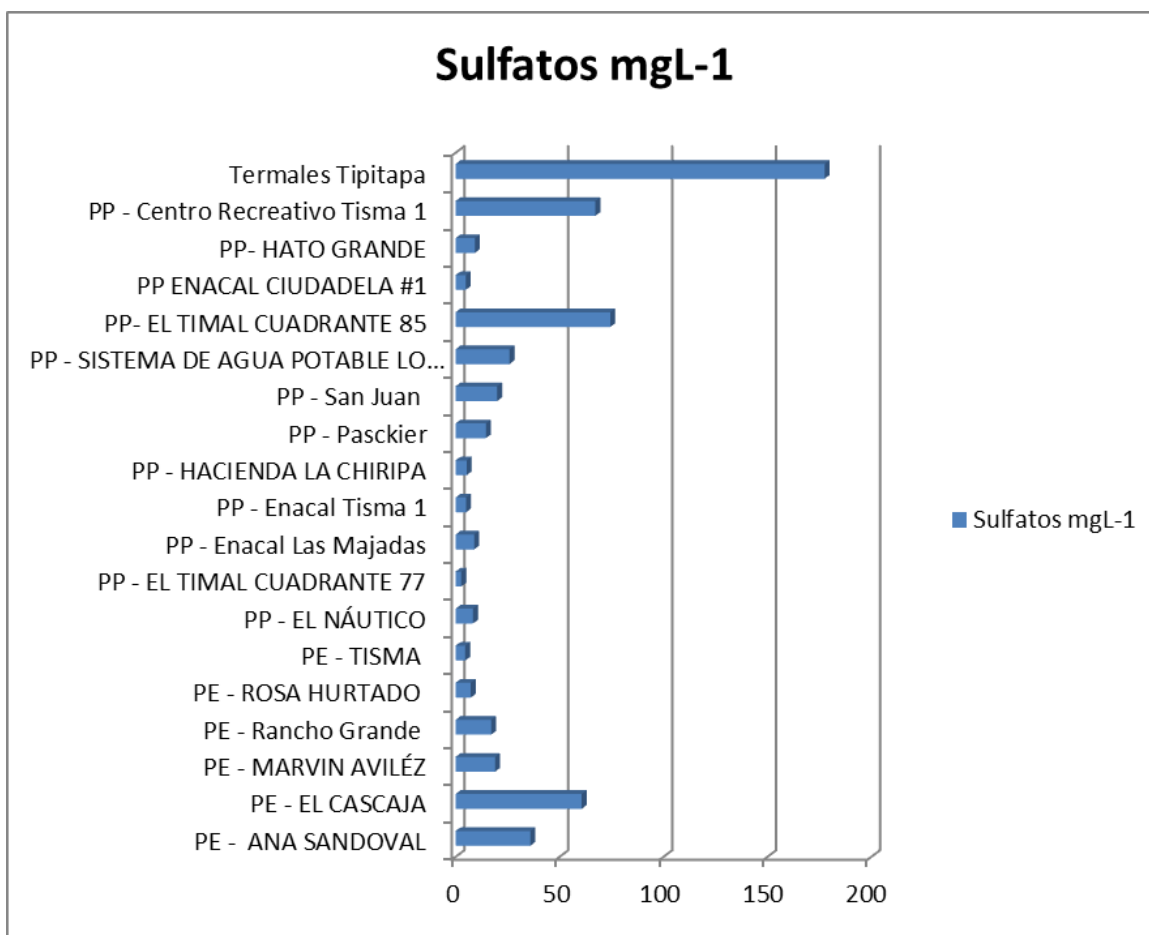


Figura 51. Concentraciones de Sulfato en Pozos Perforados y Excavados.

Los mini piezómetros MP – Hacienda San Pedro y MP- Estero El Caballo, registran concentraciones de sulfato mayores a 600 mgL⁻¹. Estas aguas son consideradas de pésima calidad, sobre pasan el valor máximo admisible de 250 mg L⁻¹ recomendado por las Normas CAPRE. Estas concentraciones anómalas pueden ser originadas por las bajas permeabilidad del suelo. No se descarta la contaminación de origen antropogénico. Tal como se describió con anterioridad estos MP se ubican en las costas del Lago Cocibolca, en el reconocimiento de campo se observó que en los sitios se siembra sandía y plátanos, en tales actividades se emplea plaguicidas y fertilizantes que aportan sales de Sulfato y estas se infiltran y percolan hacia los flujos subsuperficiales.

En relación a los piezómetros, las más altas concentraciones se detectaron en el PM3- RT (88.7 mgL⁻¹) y PM2 – RTB (69.25 mgL⁻¹). El PM3 – RT son aguas

mineralizadas, y el PM2- RTB según la estructura de bloques que controla el área tiene conexión con el Lago Xolotlán. Se infiere que estas concentraciones provengan de la mezcla entre las aguas subterráneas y el lago Xolotlán. Figura 50.

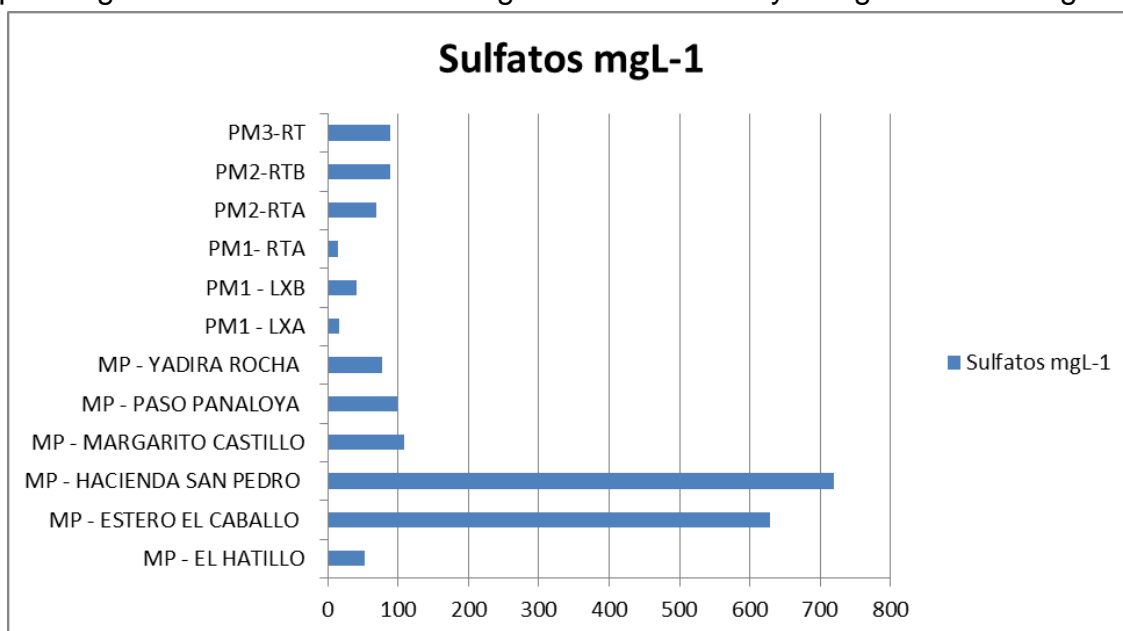


Figura 52. Concentraciones de Sulfato en Piezómetros y Mini Piezómetros.

X.3.Sodio

Generalmente la concentración de sodio está condicionada por la presencia del cloruro, es de esperar que la proporción sea equivalente a 1. Sin embargo, el índice de las relaciones sodio/cloruro en las muestras de agua son mayores a 1, indicando un exceso de sodio en relación a los cloruros. Este exceso proviene de la disolución de silicatos.

Rogers (1989) señala que, si la disolución de los silicatos es el origen de las altas concentraciones de sodio en las aguas subterráneas, estas deben de contener como el anión más abundante el HCO_3 , el cual proviene de la reacción de los minerales feldespatos con el ácido carbónico presente en las aguas, (Appelo and Postma, 2005). El coeficiente de correlación entre el sodio y el bicarbonato (0.961) es mayor que el de los cloruros (0.893), Anexo 1. Esto confirma que las altas concentraciones de sodios detectadas en las aguas subterráneas son originadas por la disolución de los silicatos.

X.3.1. Aguas superficiales:

El lago Xolotlán presenta concentraciones de 209 mg L^{-1} de Sodio. La Laguna de Tisma y el Río Tipitapa en Cascajal muestran la influencia del agua del Lago Xolotlán. En el lago Cocibolca, la concentración detectada fue de 30 mg L^{-1} , lo que indica que la Laguna de Tisma amortigua las concentraciones de sustancias y no permite que lleguen al Lago Cocibolca. Figura 53.

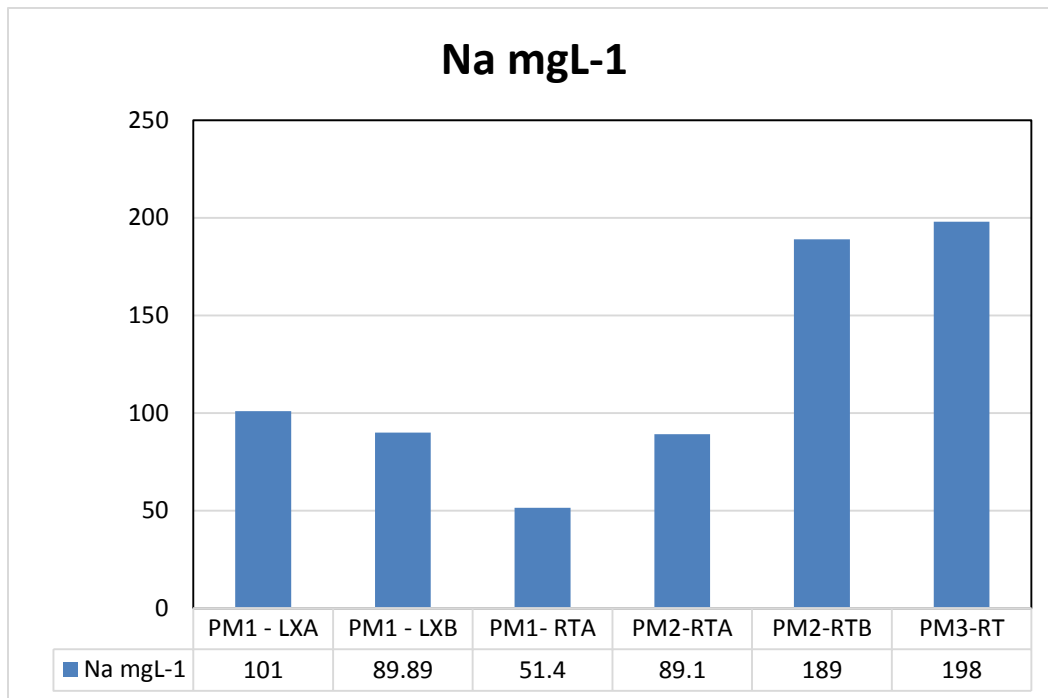


Figura 53. Concentración de Sodio en aguas superficiales.

X.3.2. Agua subterránea:

Los piezómetros que muestran mayores concentraciones de sodio, son aquellos en que afecta los procesos hidrotermales (PM3- RT) y el que el lago ejerce cierta influencia (PM2- RTB), estos resultados también coinciden con el comportamiento de Sulfatos. Figura 54.

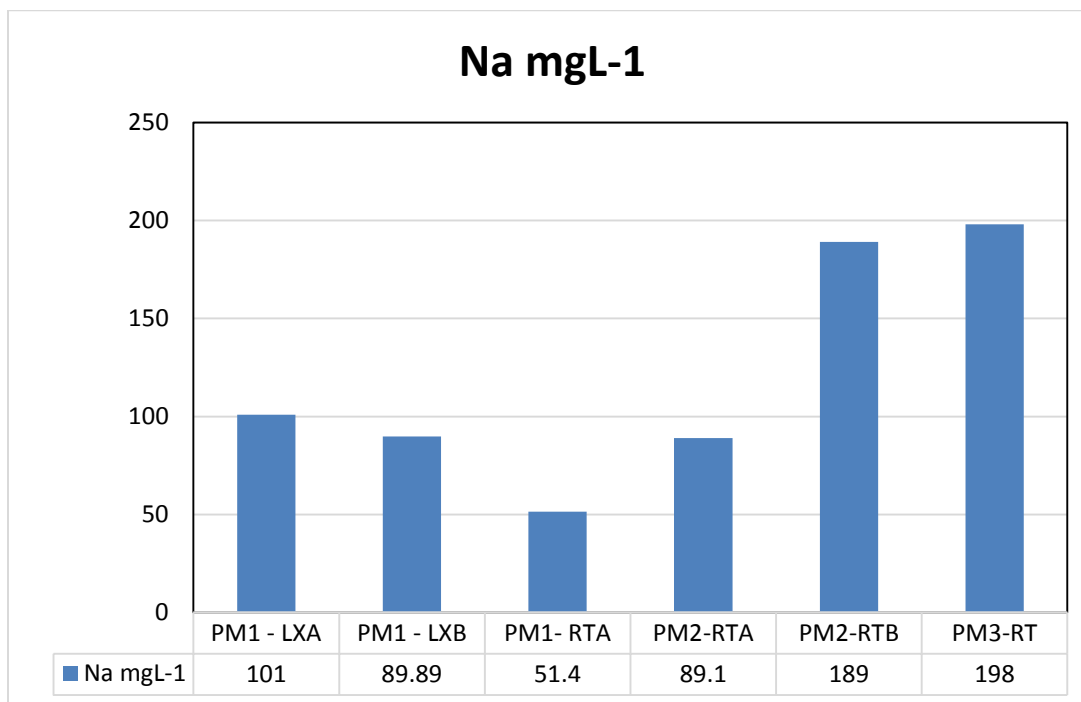


Figura 54. Concentración de Sodio en Piezómetros.

En la figura 55 se muestra las concentraciones de sodio detectadas en los mini piezómetros. En tres de ellos se observa concentraciones atípicas, que provienen no solo de la interacción del agua con el medio sino, por actividades antropogénicas (MP – Hacienda San Pedro Malacatoya y Paso Panaloya).

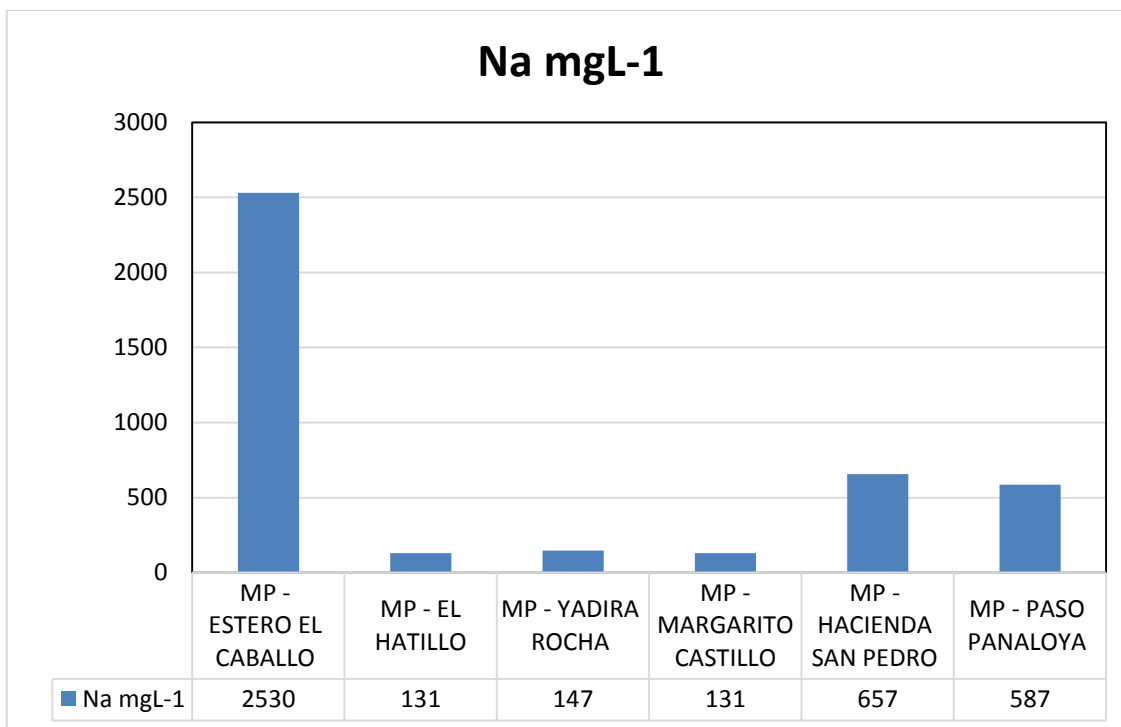


Figura 55. Concentración de sodio en Mini piezómetros.

Las mayores concentraciones de sodio fueron registradas en los pozos del acuífero Las Sierras. Las concentraciones no sobrepasan el valor máximo recomendable por la Normas CAPRE (200 mg L^{-1}). Las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras tienen mayor madurez, por mayor recorrido y tiempo de contacto entre el agua y el material que conforma el acuífero. Las aguas del acuífero Tipitapa Malacatoya, tiene menor madurez hidrogeoquímica en comparación al acuífero Las Sierras: los pozos del acuífero Tipitapa Malacatoya (PP Enacal Ciudadela #1, PP Hacienda La Chiripa) tienen las menores concentraciones de Sodio. Los pozos en que se ha evidenciado la actividad termal (aguas mineralizadas, temperaturas superiores a 32°C registran las concentraciones más altas (PP - Lo Ideal, PP – San Juan, PP- El Timal Cuadrante, PP- Hato Grande) y en los Termales de Tipitapa (283 mgL^{-1}). Figura 56.

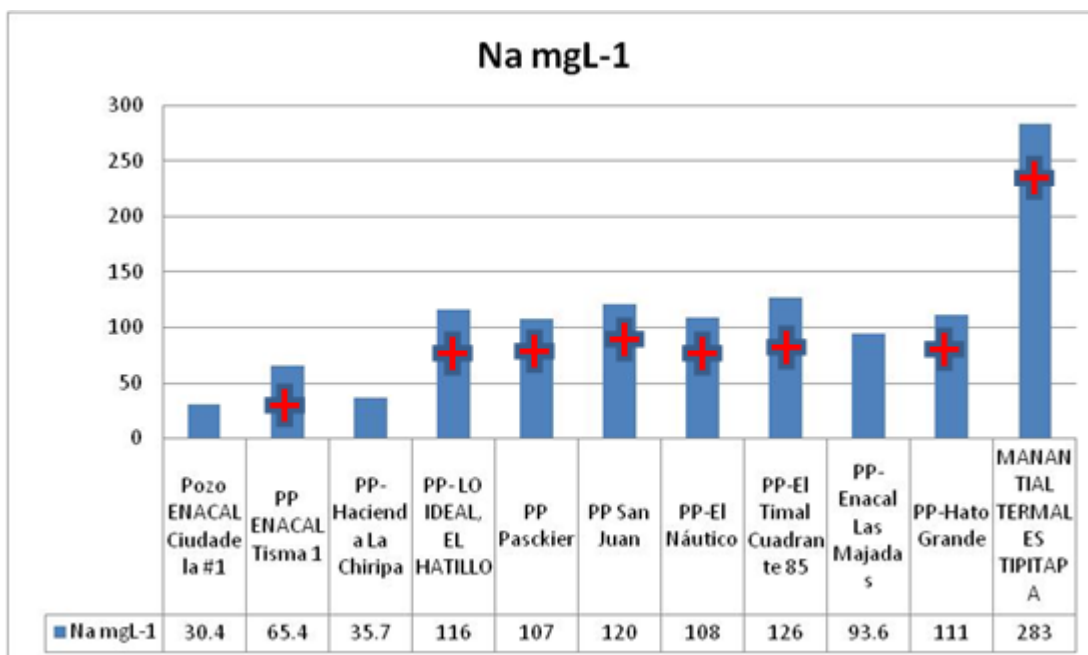


Figura 56. Concentración de Sodio en Pozos Perforados.

Pozos, acuífero Las Sierras

X.4.Calcio y Magnesio

El calcio es un constituyente esencial de las rocas ígneas y es liberado de la matriz de los materiales acuíferos por la disolución de los silicatos. El Magnesio proviene del ataque de los silicatos magnésicos y ferromagnésicos.

La concentración mínima de calcio detectada fue de 2.33 mg L^{-1} (PP – El Náutico) y un valor máximo atípico respecto al comportamiento de las muestras de 282 mg L^{-1} (MP – Yadira Rocha). En el lago Xolotlán las concentraciones de magnesio y calcio fue de 25.95 mg/L y 15.24 mg L^{-1} , respectivamente. El calcio y el magnesio aportan la dureza del agua. Según la secuencia de Chevotareb, estos cationes experimentan intercambio con el medio hidrogeológico, por lo tanto, la disminución de las concentraciones en las aguas subterráneas se debe al mayor tiempo de recorrido y del tiempo de contacto con el material geológico.

Tabla 17. Concentraciones de Calcio y Magnesio en Piezómetros y Mini piezómetros.

No	Muestra	Resultados μgL^{-1}	
		Calcio	Magnesio
1	PM1 - LXA	32.54	9.14
2	PM1 - LXB	42.85	16.84
3	PM1- RTA	42.85	12.51
4	PM2-RTA	61.69	16.17
5	PM2-RTB	27.78	12.51
6	PM3-RT	7.14	1.93
7	MP - ESTERO EL CABALLO	27.21	46.67
8	MP - EL HATILLO	39.28	22.15
9	MP - YADIRA ROCHA	282.8	137.17
10	MP - MARGARITO CASTILLO	33	13.34
11	MP - HACIENDA SAN PEDRO	80.12	42.87
12	MP - PASO PANALOYA	13.75	23.81
Normas CAPRE	VR	100	30
	VMA		50

Referente al contenido de Calcio y Magnesio en los pozos excavados, el punto que registró la mayor concentración fue el PP- Rancho Grande (56.91; 33.53), este valor es coherente con el índice de intercambio de bases. En este punto ocurre una recarga local.

X.5.Bicarbonato y Carbonato (HCO_3^- y CO_3^{2-}).

La presencia del ión bicarbonato y el ión carbonato depende fuertemente del pH del medio acuoso y ambos constituyen la fracción inorgánica del carbono en agua. (Appelo y Postma, 2005). En aguas con pH inferior a 8.3 la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. La máxima concentración detectada fue en el punto MP – Estero El Caballo (2880 mg L^{-1}).

Bajo condiciones impolutas la principal fuente de protones lo constituye el Ácido Carbónico y los ácidos orgánicos, produciendo bajo estas condiciones Bicarbonato (Appelo y Postman 2005).

El lago Xolotlán presenta condiciones alcalinas originadas por la alta productividad en sus aguas, en él se detectó concentraciones de Carbonatos y Bicarbonatos de

91.2 y 285.57 mg L⁻¹, respectivamente. En el Lago Cocibolca las concentraciones fueron de 9.6 y 79.33 mg L⁻¹.

En las aguas subterráneas la presencia de bicarbonato se origina en la disolución de los silicatos del medio hidrogeológico y en las reacciones que ocurren a raíz de la formación y disociación de H₂CO₃.

Los contenidos de Bicarbonato y carbonato se analizaron en su conjunto con otros cationes para determinar la naturaleza hidroquímica del agua.

X.6.Sílice

Las concentraciones normales de sílice en ríos y lagos oscilan entre los 5 y 25 mg/L, en aguas subterráneas entre 5 y 85 mg L⁻¹, con una media de 17 mg L⁻¹ y para aguas termales entre 100 y 600 mg/L (Langmuir, 1997). Las mayores concentraciones de sílice (120 mg L⁻¹) se detectaron en los Termales de Tipitapa y en la muestra del MP - Paso Panaloya (107.51 mg L⁻¹).

Los contenidos de sílice en las aguas subterráneas provienen de la disolución a altas temperaturas de minerales máficos tales como el olivino y el piroxeno abundantes en las rocas volcánicas como piroclastos y basaltos (Langmuir, 1997). El alto contenido de sílice en las aguas subterráneas, es un indicador de la degradación activa de los minerales de sílice. La sílice se incorpora principalmente por la disolución de minerales de olivino y piroxeno de las rocas básicas. Los principales efectos de la disolución de los silicatos lo constituyen la adición de cationes y sílice en las aguas subterráneas. Estas reacciones en el medio acuoso consumen hidrógenos y por tanto se incrementa el pH. El coeficiente de correlación entre el contenido de sílice y el pH es de -0.89, Anexo 1, el signo negativo nos indica una correlación inversa; a mayor contenido de sílice, la acidez disminuye, el medio se vuelve básico.

Las menores concentraciones de Sílice fueron detectadas en las aguas superficiales, en el Lago Xolotlán se detectó un valor de 15.25 mg/L y en el Lago Cocibolca un valor de apenas 6.5 mg/L. Tales valores son muchos menores que los registrados en las aguas subterráneas. Se infiere que el Sílice que es transportado por las aguas subterráneas a los lagos, puede ser consumido en reacciones biológicas.

Las concentraciones media en los pozos perforados fue de 52.7 mg/L y en los piezómetros de 59.08 mg/L, Anexo 9. Las concentraciones superiores a 50 mg/L nos indican la degradación activa del material geológico producto de las temperaturas y acidez del agua.

X.7.Alcalinidad

La alcalinidad permite medir la vulnerabilidad de las aguas subterráneas o superficiales a ser acidificadas. En condiciones naturales la acidez depende del dióxido de carbono atmosférico y el de la zona no saturada. Las actividades antropogénicas acidifican las aguas por el uso excesivo de estiércol y amoníaco como fertilizantes ((Appelo y Postma, 2005)). En el área de estudio predomina el uso agropecuario, por lo cual el uso de plaguicidas y fertilizantes contribuye a los cambios en el pH. Los silicatos pueden contribuir a la alcalinidad y juegan un papel muy importante como buffer en las aguas naturales (Appelo y Postma, 2005). El bicarbonato constituye la forma química que más contribuye a la alcalinidad

La Figura 57 muestra la correlación entre la concentración del bicarbonato y la alcalinidad. Es posible distinguir la relación directa del contenido de bicarbonato y la alcalinidad en la zona de los interlagos.

Custodio señala que los valores de la alcalinidad decrecen con el tiempo de residencia de las aguas subterráneas. El rango mínimo de alcalinidad fue de 81 mg L⁻¹ (punto control Lago Cocibolca) y un valor máximo de 3160.15 mg L⁻¹ (MP – Estero El Caballo). La calidad de agua del MP – Estero El Caballo difiere totalmente del resto de puntos, en particular en esta fuente se detectó las mayores concentraciones de iones.

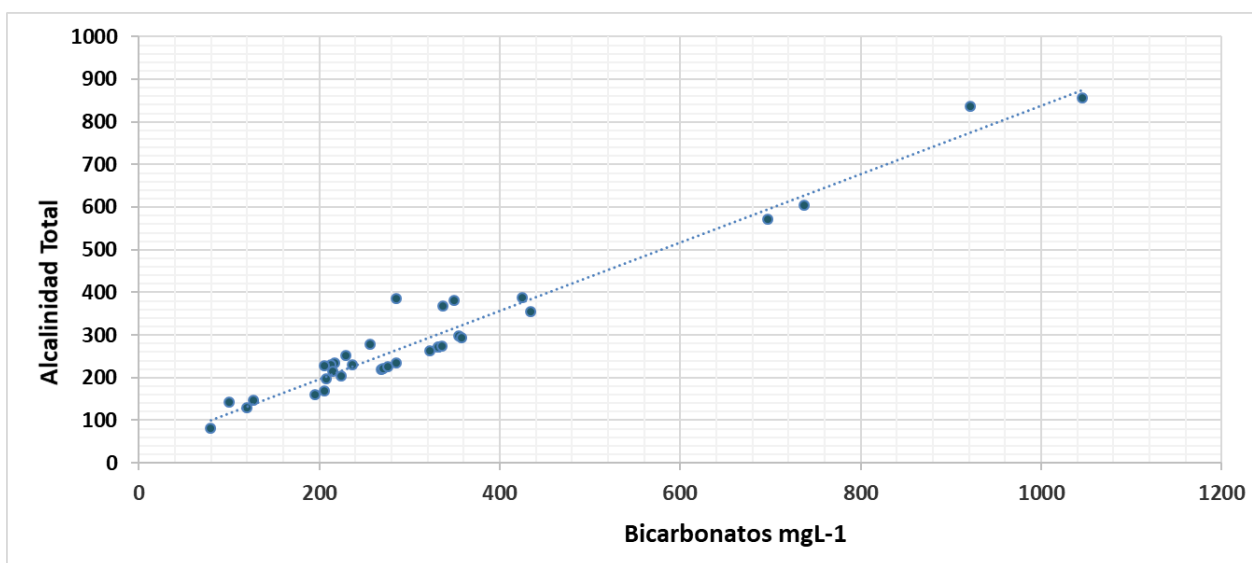


Figura 57. Relación entre la alcalinidad y el contenido de HCO₃, en muestra de agua.

X.8.Flúor

La concentración de flúor en las aguas naturales generalmente es menor a 1 mg L^{-1} (Hem, 1985) y proviene de los minerales como la fluorita y la apatita. Las concentraciones de flúor en el Lago Xolotlán y en la Laguna de Tisma sobrepasan el valor máximo recomendado (0.12 mg L^{-1}) para la protección de la vida acuática (CCME, 2004). A nivel superficial ocurre la migración de este elemento del Lago Xolotlán al Lago Cocibolca, sin embargo, este proceso, al igual que el resto de sustancias transportadas a nivel superficial, es mitigado por la Laguna de Tisma, en la figura 56 se observa que la mayor concentración (0.71 mg L^{-1}) se registra en Tisma. Aún se desconoce el impacto que pueda causar al ecosistema acuático y basados en las Normas Cananiendes de Calidad Ambiental, el contenido de Flúor constituye riesgo para la vida acuática, es necesario realizar investigaciones a detalle.

Por otro lado, la concentración de este elemento en Lago Cocibolca es menor al límite de detección del análisis. Figura 58.

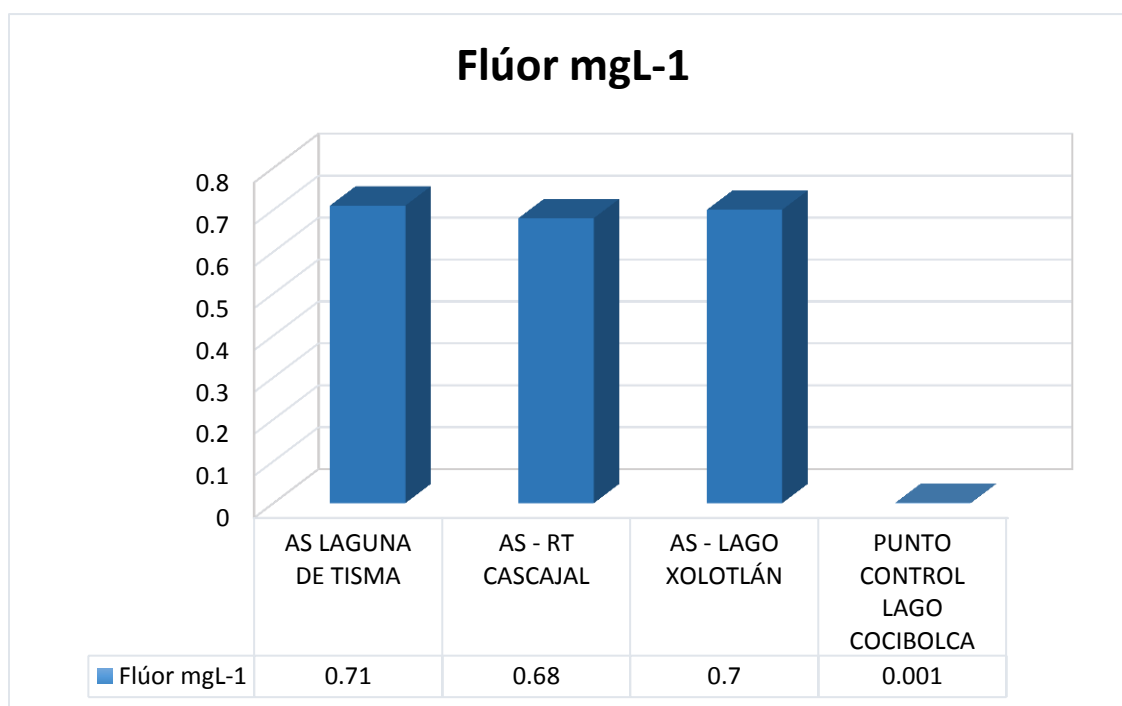


Figura 58. Cocentración de Flúor en muestras superficiales.

Las concentraciones de flúor en las muestras de agua en pozos utilizados para consumo humano, sobrepasan el valor recomendado por las Normas CAPRE (0.7 mg L^{-1}). (Hem, 19855), manifiesta que la presencia del Flúor está relacionada con

fumarolas volcánicas, por lo que este elemento está asociada a la actividad termal. Figura 59.

La Organización Mundial de la Salud recomienda una ingesta de Flúor menor a 1.5 mgL⁻¹ y señala que un consumo de agua con concentraciones superiores a la recomendada puede causar fluorosis esquelética, esta enfermedad está asociada a la osteoesclerosis, deformidad de los huesos y calcificación de los tendones y ligamentos.

La figura 60 refleja la distribución espacial del Flúor. Las mayores concentraciones son detectadas en áreas con fallamientos. Es importante resaltar que en estos pozos también se registró temperaturas superiores a los 32°C. En particular en el pozo Centro Recreativo Tisma se midió una temperatura de 37.1 °C: El valor más alto fue detectado en el punto Centro Recreativo Tisma 1 (3.5 ppm), seguido de los Termales Tipitapa. La actividad termal es la causa de las altas concentraciones de flúor en las aguas subterráneas. Bajo las circunstancias determinadas se infiere que el Flúor detectado proviene de la actividad tectónica y del termalismo del terreno. Las concentraciones detectadas en los pozos representan un riesgo para la población que los utiliza como fuente de abastecimiento para su bebida.

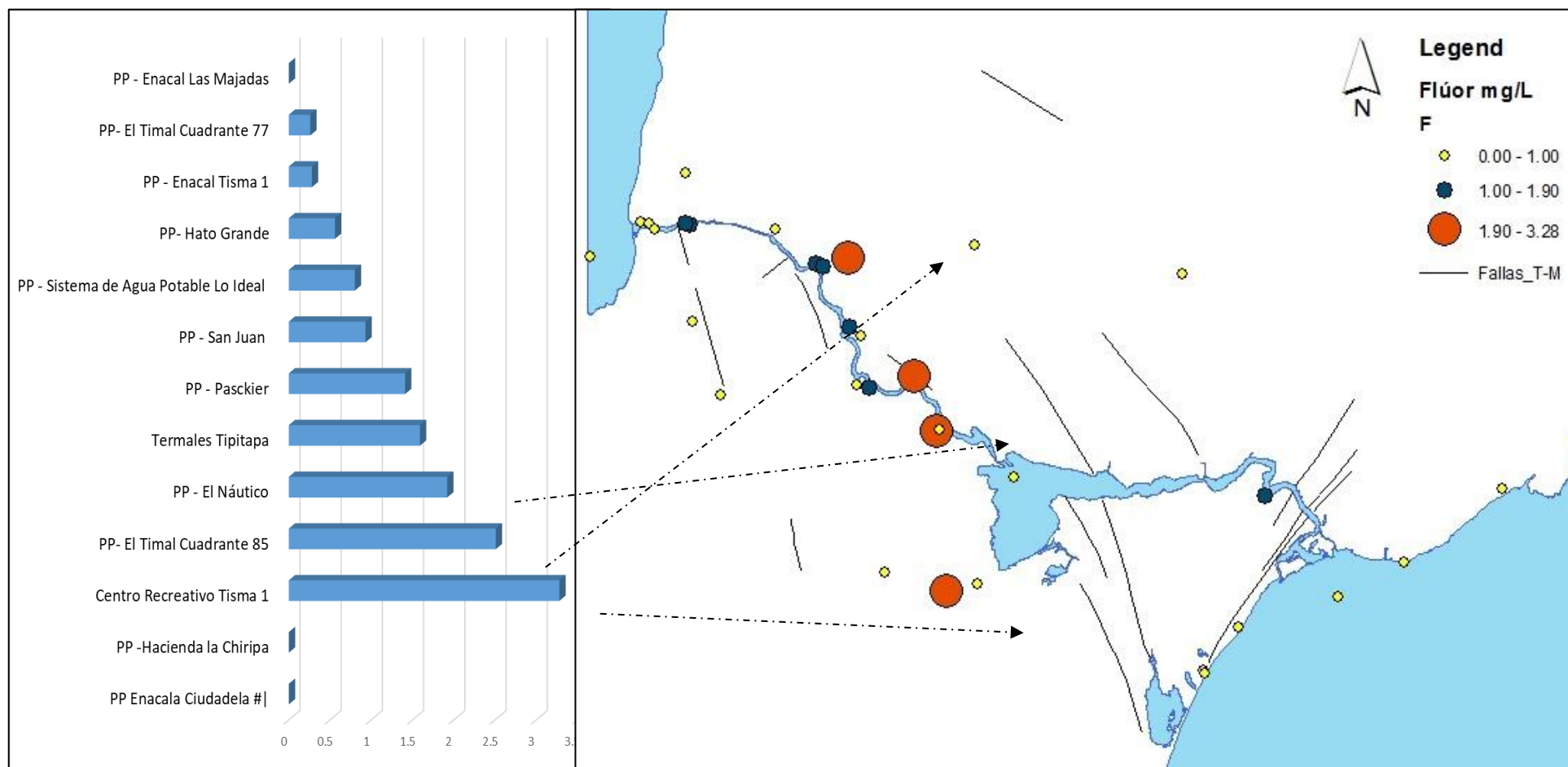


Figura 59. Concentraciones de Flúor en pozos perforados.

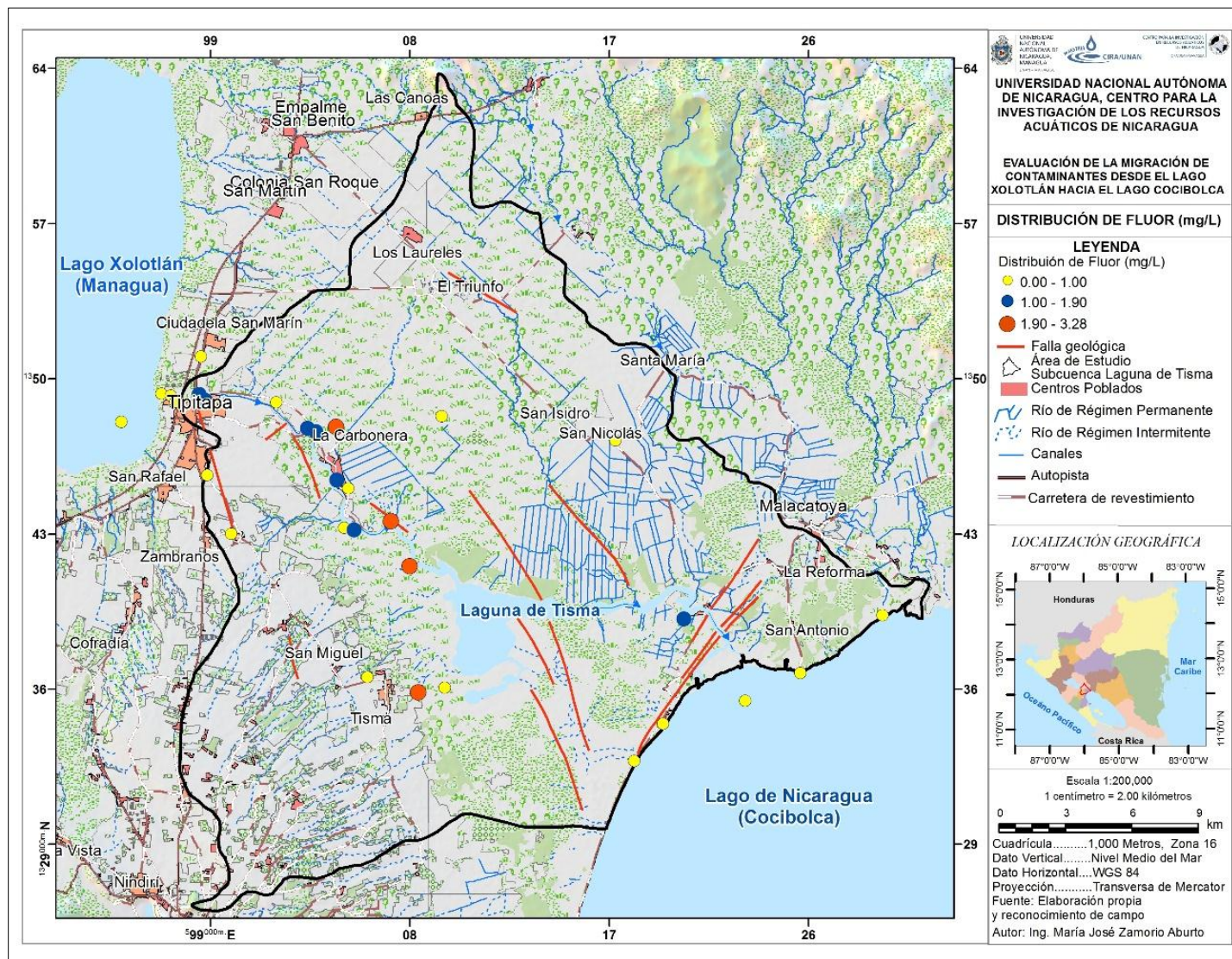


Figura 60. Distribución espacial de Flúor en la zona de estudio.

X.9.Arsénico

El arsénico está presente en los gases volcánicos y es constituyente común en las aguas geotermales (Hem, 1989). Las concentraciones de arsénico mayores a $10 \mu\text{g L}^{-1}$ puede resultar en lesiones en la piel, manchas en las manos, cáncer de piel y otras enfermedades (Karim, 2000 citado por Apelo (2005). (Hem, 1985) señala que el Arsénico es un componente de algunos plaguicidas utilizados en algunas actividades agrícolas. Si este está siendo utilizado en la zona puede incorporarse a los ríos o aguas subterráneas a través de residuos desechados o drenajes agrícolas. Los estados de oxidación más comunes del arsénico son -III, 0, +III, +V. La especie predominante de arsénico inorgánico en los sistemas acuáticos aeróbicos es el arseniato As (V) como H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} , mientras que en ambientes reductores la forma predominante es el arsenito As (III) como H_2AsO_3 y H_2AsO_3^- .

Los lagos Cocibolca y Xolotlán, son medios aeróbicos, por lo que prevalece el estado de oxidación +V. El pH de ambos lagos está en el rango de 8.40 y 8.51, con valores de potencial redox positivo, por tanto, se encuentra como H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} . Las Normas Canadienses para la Protección de la Vida Acuática recomiendan no sobrepasar la concentración de $5\mu\text{g L}^{-1}$ en cuerpos de agua dulce. La Figura 61 expone los resultados de Arsénico en aguas superficiales, en noviembre ¹2010 y en abril 2012. El Lago Xolotlán contiene concentraciones significativas de Arsénico. También se observa que la Laguna de Tisma ejerce un papel significativo, sirviendo como filtro que mitiga la migración del Arsénico hacia el Lago, en detrimento de la propia salud de la Laguna.

La Laguna de Tisma representa un sistema de humedales de importancia Internacional (Sitio Ramsar número 1141), por lo que todas estas sustancias atentan contra este hábitat. Salvatierra (2007), describió que la Laguna de Tisma recibe las descargas de las aguas residuales provenientes de las actividades agrícolas, ganaderas y domésticas procedentes de las áreas de drenaje aledañas. La investigación incluyó análisis de arsénico que resultaron con concentraciones de 6, 55 - 4, 12 $\mu\text{g L}^{-1}$, (Nov. 2005). El origen se atribuye a causas naturales, sin descartar causas antropogénicas. Se señala que en la cuenca se cultiva arroz, para el cual se ha utilizado compuesto a base de arsénico (arseniato de potasio - dihidrogenoarsenato de potasio (KH_2AsO_4), para la limpieza de tierras previo a la siembra. Figura 62.

¹ Estudio INETER CIRA

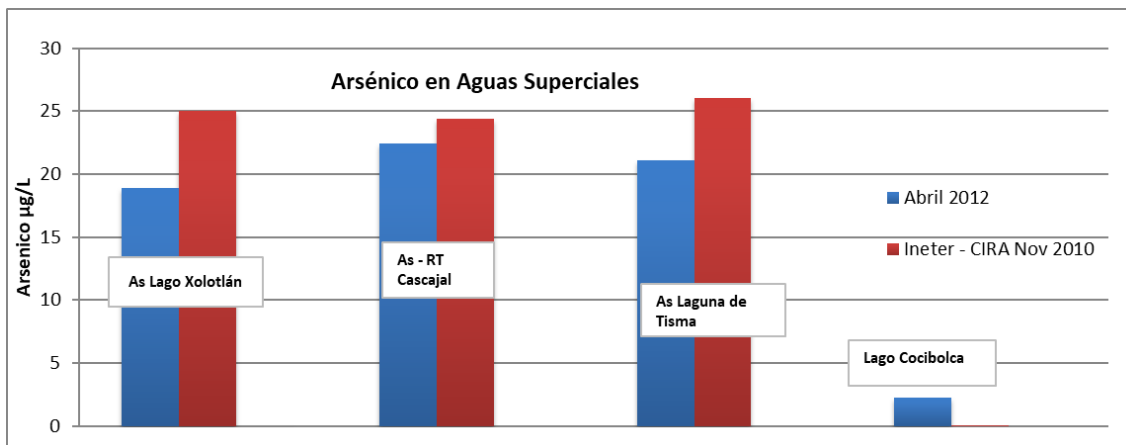


Figura 61. Concentraciones de Arsénico en aguas superficiales en diferentes eventos de muestreo.

Referente a la presencia de arsénico en el Cocibolca para el año 2010 al 2012 se detectó concentraciones trazas del metal, cuyo origen se atribuye a las aguas del Lago Xolotlán. El informe de la cuenca del Rio San Juan (MARENA, 2003), estableció que no se determinó arsénico en el agua de los tributarios que drenan al Cocibolca en la época de muestreo, sin embargo, los volcanes de la Isla de Ometepe y calderas antiguas pueden estar contribuyendo con este metal. Para este muestreo en particular se atribuye que el As del Cocibolca proviene del Xolotlán.

X.9.1. Arsénico en Pozos Perforados:

En el 100% (siete) de las muestras analizadas se detectó Arsénico. El 57% de los puntos muestreados sobrepasan el valor máximo permitido de $10 \mu\text{g L}^{-1}$ recomendado por la Organización Mundial de la Salud para la ingesta. Todos esto pozos son de abastecimiento, por lo cual los pobladores están expuestos a las consecuencias de consumir agua con Arsénico. Figura 62.

La movilidad del Arsénico en el medio hidrogeológico depende del pH y el estado de oxidación – reducción del medio. El estado oxido - reductor del medio no fue medido, sin embargo, de acuerdo a las concentraciones de algunas especies geoquímicas (NO_3 , NH_4), se establece si el medio es básico o reductor. En la Tabla 19 se muestra los resultados de las especies de nitrógeno detectadas en los pozos perforados. En aquellos pozos que las concentraciones de Arsénico

sobrepasan los valores umbrales predominan condiciones reductoras que incrementan la movilidad de los compuestos de As. Las concentraciones del arsénico en las aguas subterráneas se concentran en la zona de fallamiento del terreno.

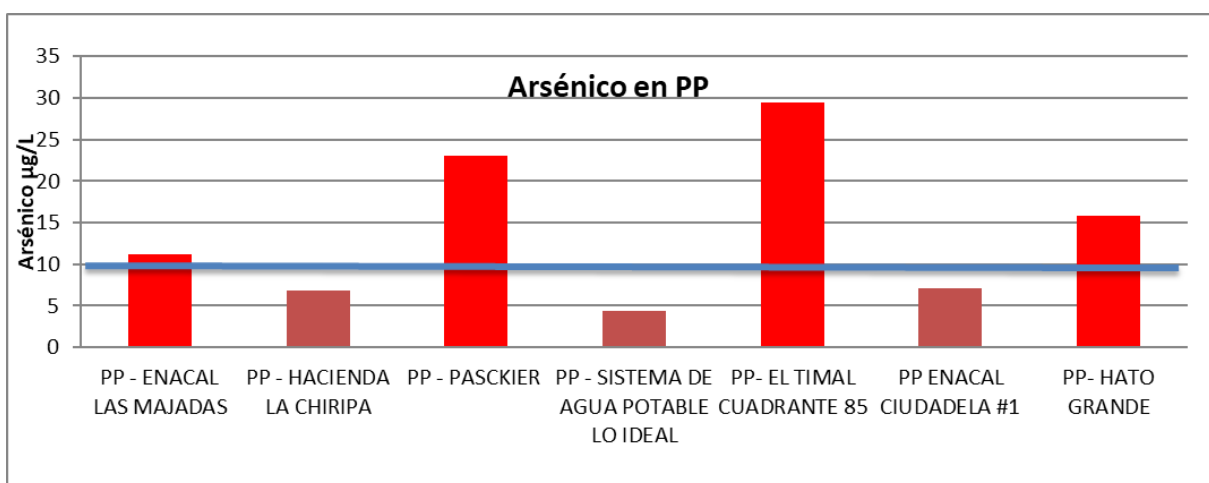


Figura 62. Concentraciones de Arsénico en Pozos Perforados.

X.9.2. Arsénico en pozos excavados

En el único pozo excavado muestreado se detectó Arsénico, en concentraciones altas de $17.78 \mu\text{g L}^{-1}$. El pozo está ubicado a 15 metros del Río Tipitapa, por lo que esta concentración se atribuye al aporte del agua del Río. En este pozo también se detectó concentraciones de Aluminio, cuyo origen está asociado a la interacción entre ambos sistemas (Río – Acuífero).

En los Piezómetros, se detectó arsénico en todas las muestras analizadas. Las máximas concentraciones fueron detectadas en el punto PM1- LXB ($14.49 \mu\text{g L}^{-1}$). En el siguiente esquema se muestra las concentraciones del metal en los piezómetros instalados a diferentes profundidades, no se observa una correlación clara entre la profundidad y la concentración. El arsénico presente en estos puntos proviene de la geología del área. El PM3-TR perforado cercano a los termale de Tipitapa muestra la menor concentración del metaloide.

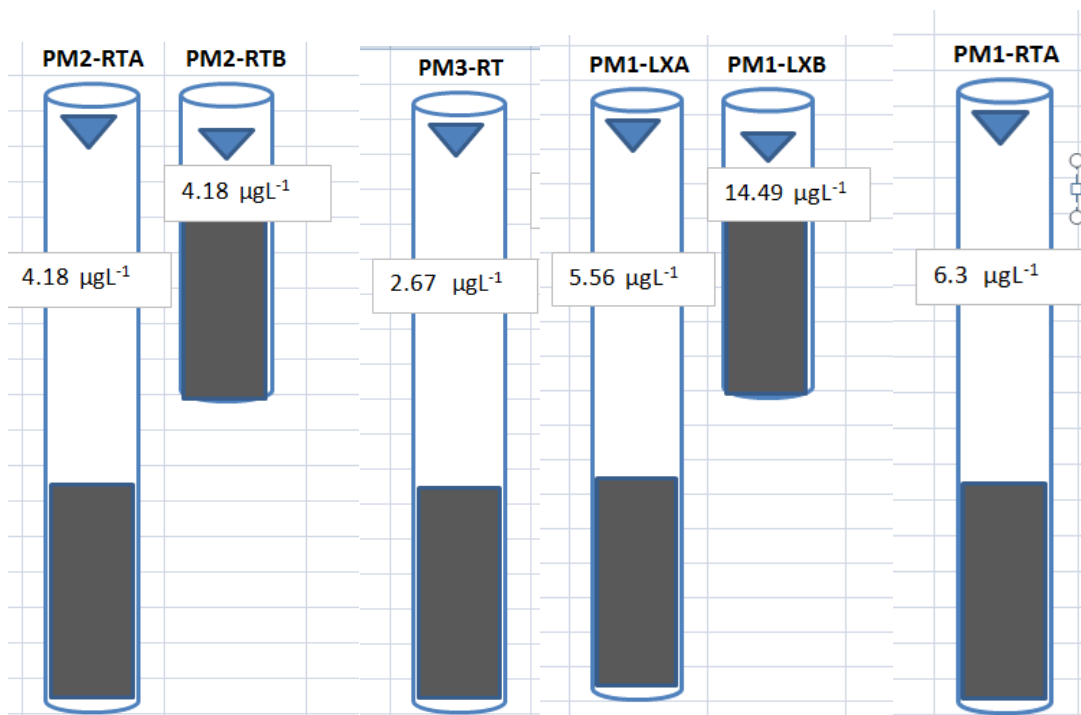


Figura 63. Concentraciones de Arsénico en Piezómetros.

En tres de los cuatro MP se detectó arsénico, el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ de estos piezómetros (Tabla 14) refleja que su contenido isotópico proviene de una mezcla entre aguas empobrecidas y enriquecidas, el arsénico detectado puede provenir tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Estos piezómetros interceptan aguas de descarga regional, en la figura 64 se ploteó las concentraciones de Arsénico detectadas y el contenido de ^{18}O .

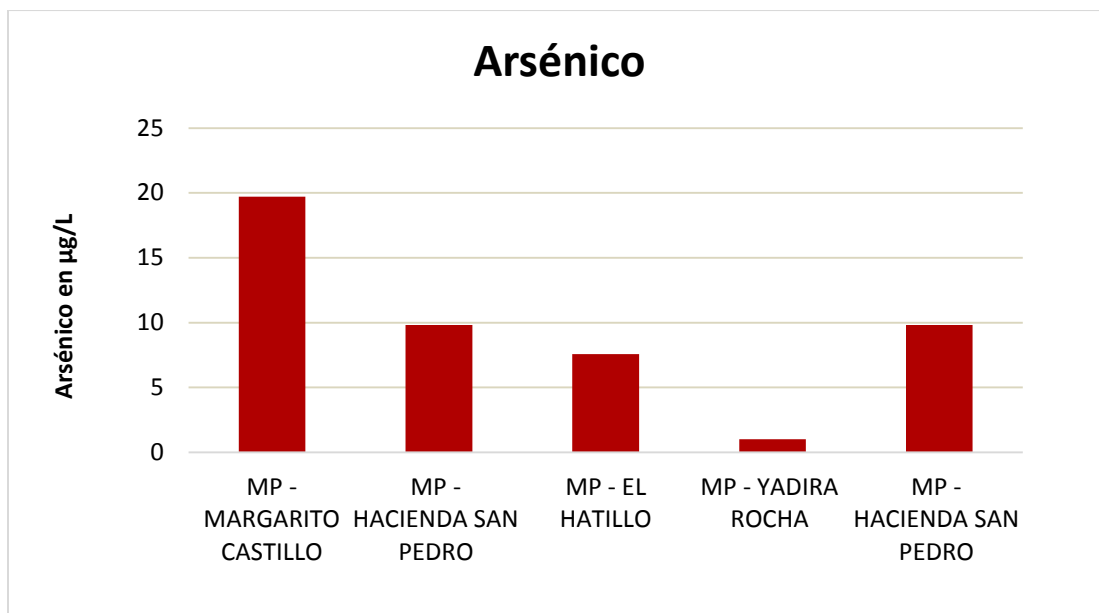


Figura 64. Concentraciones de Arsénico en Mini Piezómetros.

Para analizar el origen del arsénico se estudió la concentración del metaloide versus el origen del agua. Figura 65. Las mayores concentraciones detectadas en los pozos perforados de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas pueden asociarse a un origen natural. Las concentraciones atípicas encontradas en los mini piezómetros y pozos excavados cercanos al río Tipitapa y al Xolotlán se atribuyen a la interacción de flujo subsuperficiales.

Las concentraciones detectadas en los piezómetros instalados en las costas del Lago Cocibolca deben estudiarse a profundidad mediante técnicas que definan los flujos profundos y subsuperficiales.

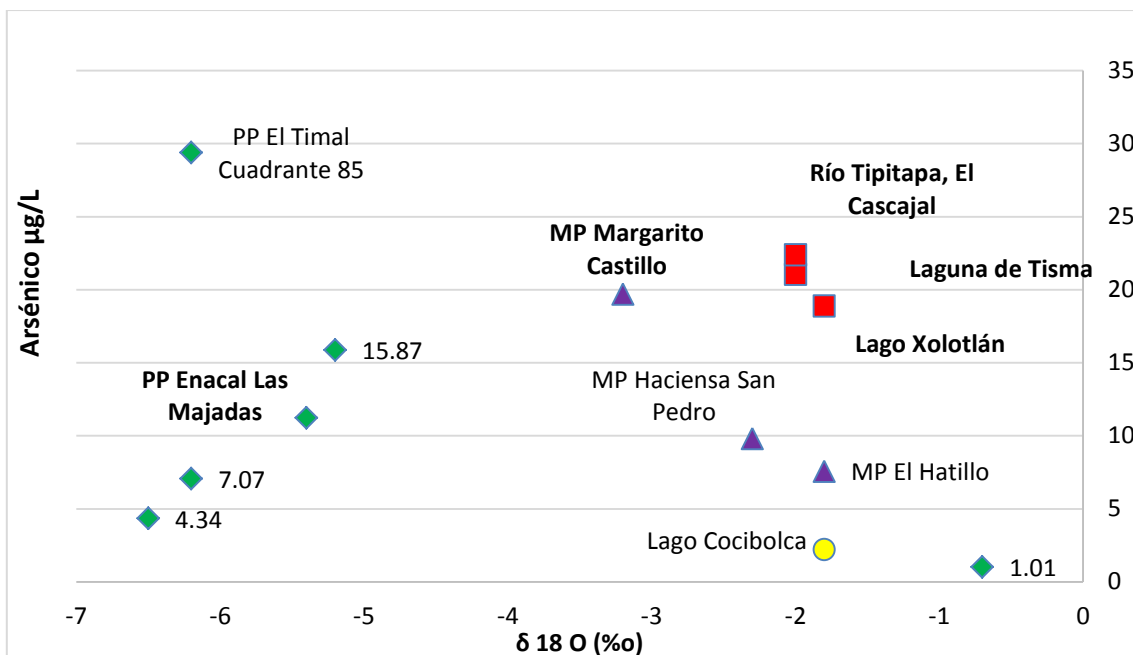


Figura 65. Relación del Arsénico con el contenido de ^{18}O en pozos perforados y Piezómetros.

X.10. Compuestos Nitrogenados (Nitrato, Amonio, Nitrito)

La concentración de las especies nitrogenadas en las aguas se debe al aporte de aguas residuales y uso de fertilizantes. El nitrato predomina en medios aerobios. En medios anaerobios predominan el nitrito y el amonio. La Tabla 18 resume los resultados de los compuestos nitrogenados en las aguas superficiales.

Tabla 18. Concentraciones de compuestos nitrogenados en aguas superficiales.

Muestras	Lago Xolotlán	De Río Tipitapa	Laguna de Tisma	Lago Cocibolca
NO_3^-	<LD	<LD	<LD	<LD
NO_2	0.010	0.010	0.010	<LD
NH_4^+	0.136	0.081	0.199	0.146

A nivel superficial no existe migración de compuestos nitrogenados del lago Xolotlán al lago Cocibolca. Las concentraciones de NO_3 y NO_2 están en el límite de detección del análisis en el laboratorio. El Lago Xolotlán sufre un acelerado proceso de eutrofización, todo el nitrógeno que recibe es asimilable de forma casi inmediato por el fitoplancton, limitando su disponibilidad en la columna de agua, por esto las concentraciones son mínimas.

En los pozos perforados y excavados se determinó nitratos. El punto PE – Rancho Grande sobrepasa el valor máximo recomendable de 50 mg L⁻¹. Todos los pozos de ENACAL presentan concentraciones de nitratos y aunque no sobre pasa el valor recomendado por la Normas CAPRE (1983), es recomendable su monitoreo periódico y evaluar las posibles fuentes que estén aportando nitrógeno es sus diferentes formas a las aguas subterráneas.

El amonio, la especie que predomina en medios reductores fue determinada en todos los pozos excavados y perforados, sin embargo, las concentraciones son menores a los valores recomendados por las Normas CAPRE (0.500 mgL⁻¹) a excepción del pozo que abastece a la comunidad El Hatillo, el PP- Sistema de Agua Potable Lo Ideal, ubicado en la costa Oeste del Cocibolca. La concentración detectada en este pozo (Tabla 19) sobrepasa casi cuatro veces valor admisible para que una fuente de agua sea segura.

Tabla 19. Concentración de Nitratos, Nitritos y Amonio en Pozos Perforados y Excavados.

Fuente	NO₃⁻	NO₂⁻	NH₄⁺
PE – Rancho Grande	84.88	0.095	0.039
PE – ROSA HURTADO	19.67	0.013	0.071
PP ENACAL CIUDADELA #1	12.76	<ld	0.086
PP – Enacal Las Majadas	7.53	0.003	0.115
PP – Enacal Tisma 1	5.32	0.007	0.064
PE – MARVIN AVILÉZ	4.080	0.02	0.107
PP – HACIENDA LA CHIRIPA	4.030	<ld	0.104
PP – SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	0.75	<ld	1.898
PE - ANA SANDOVAL	0.400		0.073
PP- HATO GRANDE	0.310	0.01	0.082
PP – San Juan	0.310	0.003	0.079
Termales Tipitapa	0.025	0.003	3.815
PP- EL TIMAL CUADRANTE 85	0.025	<ld	0.111
PP – Pasckier	0.025		0.144
PP – EL NÁUTICO	0.025	<ld	0.146
PE – TISMA	0.025	0.08	0.062
PE – EL CASCAJA	0.025	0.01	0.074
Centro Recreativo Tisma 1	0.025	0.01	0.093
Valor Normas CAPRE Admisible	50.00		0.500

X.11. Boro

Las aguas cerca de las zonas volcánicas y en termales, pueden tener concentraciones considerables de boro (Hem, 1985). La Directiva Europea 98/83/CE establece para el boro un límite de concentración en el agua potable de 1 mg L^{-1} , La Organización Mundial de la Salud (OMS), recomienda un valor máximo admisible en el agua potable de 2.4 mg L^{-1} .

El boro es un elemento esencial para las plantas, pero en grandes concentraciones es tóxico para la vegetación. En el lago Xolotlán se reportan concentraciones de 1.4 mgL^{-1} . La Figura 64 muestra las concentraciones de boro en agua superficial.

Las concentraciones de boro detectadas para el año ²2012, son mayores que en relación al muestreo del 2010, probablemente esta diferencia radica en el caudal. Nuevamente se observa el papel que juega la laguna de Tisma para frenar la migración del Boro procedente del Lago de Xolotlán al Cocibolca. Figura 66.

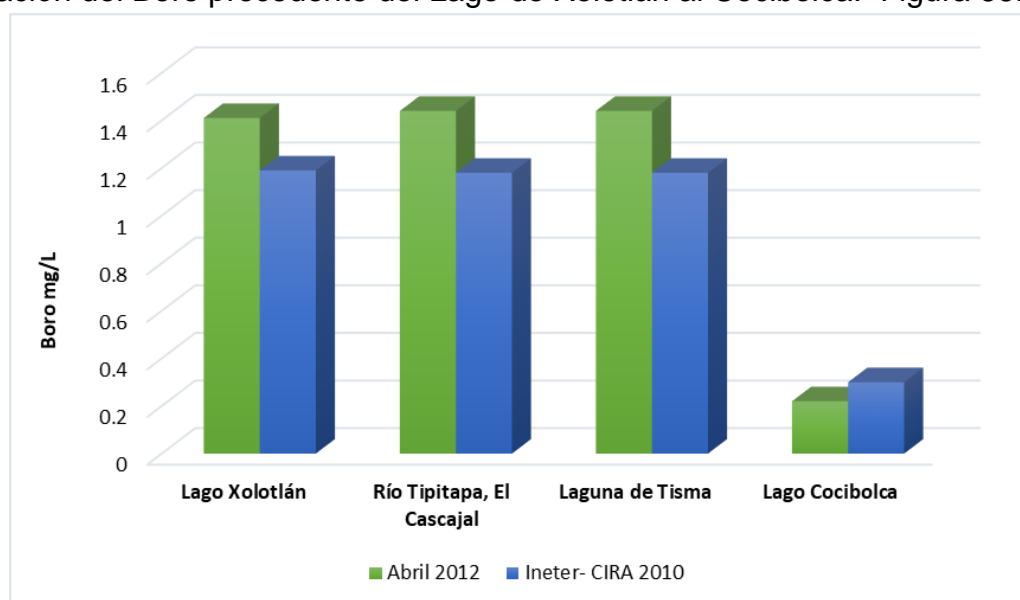


Figura 66. Concentración de Boro en aguas superficiales, muestreo 2012 comparado con muestreo de 2010.

En referencia a la presencia de Boro en las aguas subterráneas, las mayores concentraciones fueron detectadas en los Termales de Tipitapa (8.78 mgL^{-1}). En los pozos perforados y excavados se detectó concentraciones de boro menores a 1 mg L^{-1} . A excepción del punto Centro Recreativo Tisma 1 (1.16 mg L^{-1}), las

² Estudio Marena CIRA

temperaturas en el pozo son superiores a 37 °C. El Boro detectado procede de la actividad termal en el área.

En el MP – Estero El Caballo se detectó una concentración anómala de 11.47 mg L⁻¹ de Boro. Todos los iones analizados en él se presentan anómalos. Este MP está ubicado sobre una fractura. Otro sitio donde también hubo concentraciones elevadas de Boro fue (4.71 mgL⁻¹) en el punto PM 3 – RT. Tal como fue descrito en los párrafos anteriores el PM3- RT se localiza en un área con manifestaciones termales, en el punto se registró temperaturas superiores a 36 °C, son aguas muy mineralizadas del tipo hidroquímico Cloruradas Sódicas. El boro detectado proviene de la actividad termal.

X.12. Aluminio

El Aluminio en las aguas subterráneas generalmente es menor a 1mg L⁻¹ y su presencia depende del pH. Las concentraciones más altas se encuentran en pH menores a 4. (Hem ,1985). Las Normas Canadienses establecen valores guías para la protección de la vida acuática de 100 µg·L-1 a pH ≥6.5 y de 5 µg·L-1 a pH <6.5.

En el muestreo del 2010 realizado por CIRA, INETER y MARENA, comparados con abril 2012, por efecto de la dilución se esperaba encontrar mayores concentraciones en la época seca, sin embargo, en la figura 67, se observa que a mayores caudales mayor es la concentración de Al en las aguas superficiales. El pH en ambos lagos es mayor a 8 unidades, bajo estas condiciones el aluminio no es soluble y este está sorbido en el material particulado. A diferencia del resto de metales las concentraciones de Al son mayores en el Lago Cocibolca. La cuenca de drenaje del lago es de aproximadamente 14,707 km² y en él descargan ríos y aguas subterráneas que transportan el Al originado por la meteorización y degradación del material geológico tales como las rocas andesíticas que contienen plagioclasas ricas en minerales aluminosilicatos de Na y K (fuente), las cuales producto de la interacción entre el agua y la roca liberan el aluminio

Las concentraciones detectadas de aluminio en las aguas superficiales sobrepasan el valor umbral de 100 µg L⁻¹ establecidos en las normas canadienses para la protección de la vida acuática (2002).

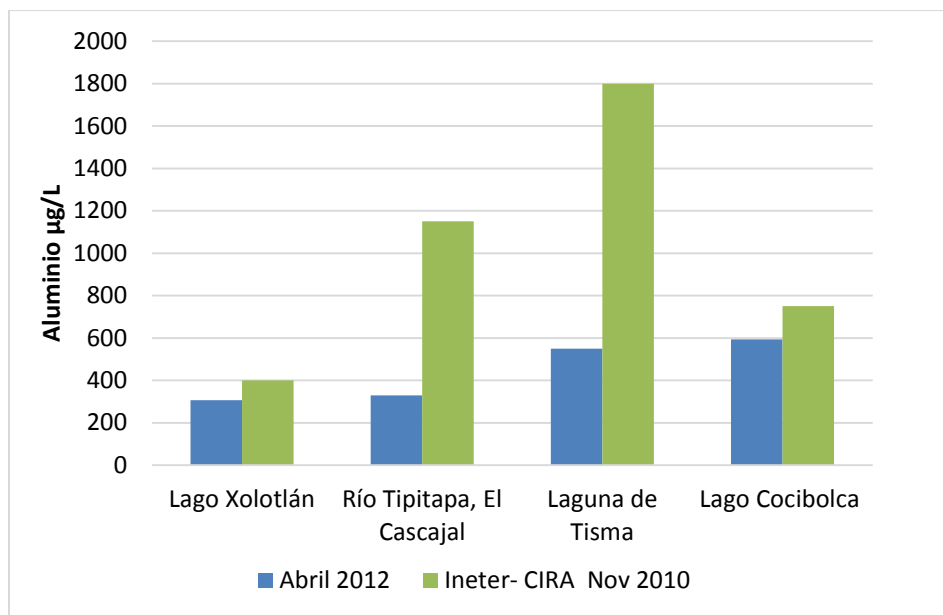


Figura 67. Concentración de Aluminio en Aguas Superficiales.

En los pozos perforados y excavados se detectó aluminio en cinco puntos. De estas, el pozo excavado PE – Marvin Avilés con una concentración de $298 \mu\text{gL}^{-1}$, sobre pasa el valor recomendado por las normas CAPRE (1983), de $200 \mu\text{gL}^{-1}$. Este pozo muestra una clara conexión subsuperficial con el Río Tipitapa ($400 \mu\text{gL}^{-1}$). Figura 68. Este comportamiento también es coherente con las concentraciones de Arsénico detectado en este mismo pozo.

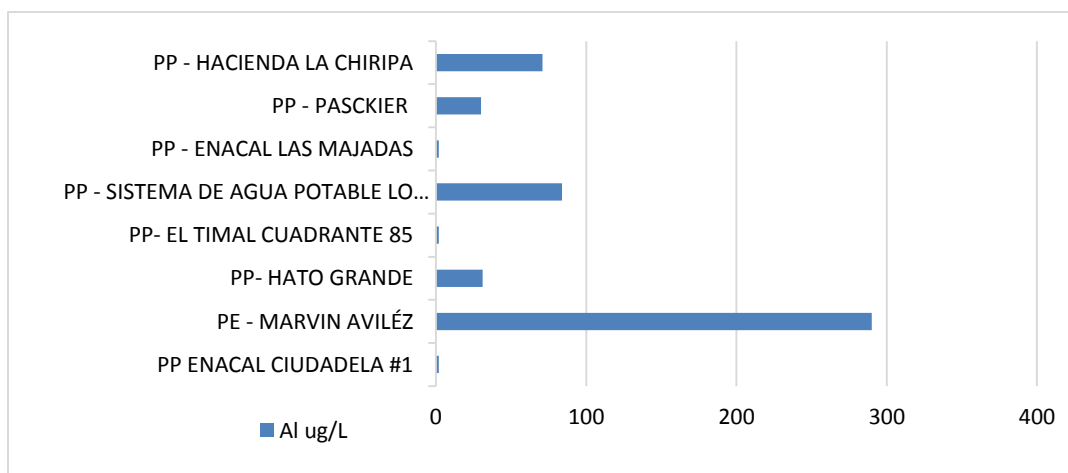


Figura 68. Concentraciones de Aluminio en aguas subterráneas.

(Hem, 1985) señala que solo en aguas con pH menores a 4 unidades se encuentran altas concentraciones de Al, en ninguno de los piezómetros y mini piezómetros muestreados presenta pH menores a 7. Las concentraciones de Al detectadas en los piezómetros PM1 – LXB, PM2 RT- B y PM3 – RT son anómalas. Estas altas concentraciones probablemente son producto de la formación de complejos iónicos presentes como material particulado de $0.10\ \mu\text{m}$, originada en el proceso de perforación de los piezómetros. Partículas de este tamaño ($0.10\ \mu\text{m}$) puede pasar a través de los filtros utilizados para el análisis de agua. Figura 69.

Para la instalación de los piezómetros se empleó perforación mecánica, la cual destruye la roca y esto puede poner a disposición en el agua complejos iónicos provenientes de la pulverización de la roca del medio hidrogeológico. Estas rocas son agregados de material ígneo tal como feldespatos, y anfíboles. El producto más extremo de la disolución de silicatos es la gibbsita o $\text{Al}(\text{OH})_3$

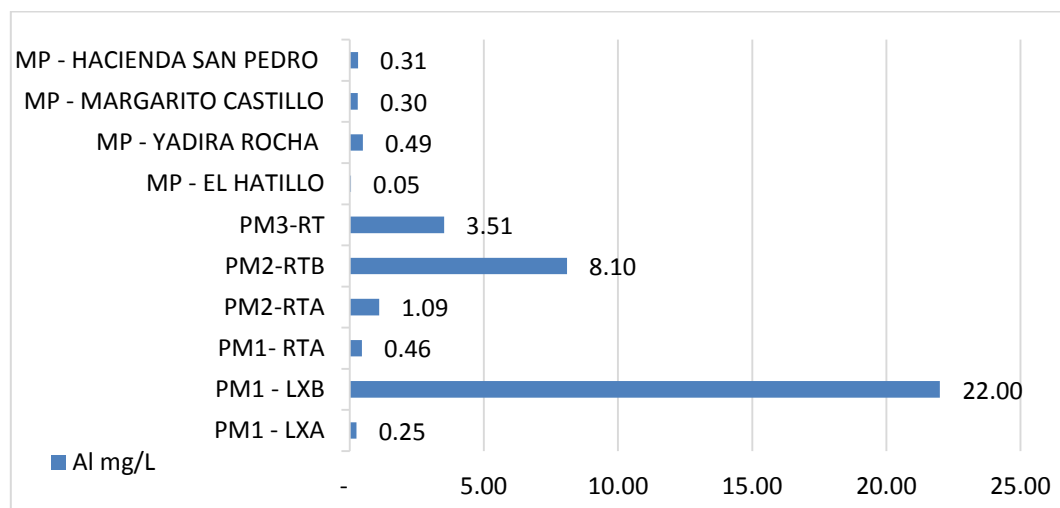


Figura 69. Concentración de Aluminio en Piezómetros y Mini piezómetros.

X.13. Cadmio

Se realizó análisis de Cadmio, pero en ninguna de las muestras se detectó.

X.14. Zinc

Las condiciones aerobias y con pH alcalino en los lagos, la laguna y el Rio favorece favorecen la inmovilidad del metal, en ningunas de las muestras de aguas superficiales se detectó Zinc.

En las muestras tomadas de los pozos perforados y excavados solo se detectó Zn en el punto PP – Sistema de Agua Potable Lo Ideal, con una concentración de $67.9 \mu\text{g L}^{-1}$. El Zn no es elemento natural en las aguas subterráneas y su presencia probablemente sea producto del desprendimiento del material que compone la tubería del pozo u otra fuente antropogénica. La concentración detectada no sobre pasa el valor máximo recomendable por las Normas CAPRE ($3000 \mu\text{gL}^{-1}$).

Por otro lado, el Zinc fue detectado en los piezómetros PM-1LXB ($35.95 \mu\text{gL}^{-1}$), PM2 – RTB ($46.6 \mu\text{gL}^{-1}$). En los mini piezómetros se encontró concentraciones anómalas en el MP – Margarito Castillo ($10607.6 \mu\text{gL}^{-1}$), MP – Yadira Rocha ($1003.6 \mu\text{gL}^{-1}$) y concentraciones traza en el MP – El Hatillo ($76.7 \mu\text{gL}^{-1}$). El Zinc es un elemento que forma parte de compuestos de plaguicidas y fertilizantes, es muy probable que estas concentraciones provengan de la lixiviación de estos productos químicos utilizados en la agricultura.

X.15. Plaguicidas.

En esta investigación se realizó el análisis de tres grupos de plaguicidas: Organoclorados, Organofosforados y Herbicidas. Las muestras fueron tomadas en dos pozos perforados utilizados para el abastecimiento a las comunidades y en dos puntos de aguas superficiales, Estero El Caballo y la Laguna de Tisma.

Los plaguicidas tienen la particularidad de adherirse a la materia orgánica de suelo y de los sedimentos, son pocos solubles en agua y es de esperarse que viajen adheridos al material suspendido o particulado, por ello se tomó también muestras en los sedimentos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación.

X.16. Herbicidas.

Se analizaron 11 muestras de herbicidas en las matrices ambientales agua y sedimento, pero no se detectó en ninguna de las muestras. Los herbicidas analizados se han listado en la tabla 7.

X.17. Plaguicidas Organoclorados.

Los organoclorados son un grupo de plaguicidas muy persistentes, con baja solubilidad en el agua y tienden a bioacumularse. Por su baja biodegradación y persistencia aún continúan detentándose en suelos y aguas La Legislación

Nicaragüense prohíbe el uso de algunos de ellos, sin embargo, aún siguen siendo utilizados.

Estudios realizados por ENACAL (2007, 2008) INETER, CIRA y MARENA (2010), para monitorear la calidad del agua lago Xolotlán, realizaron el análisis de plaguicidas organoclorados, detectando trazas de Heptacloro. Los informes concluyen que las concentraciones detectadas no constituyen riesgo a la biota ni a la calidad del agua del Lago.

En este trabajo se detectó trazas de pp - DDE ($0.43 \mu\text{g L}^{-1}$) en el Pozo perforado PP - Pasquier. Este es un metabolito producto de la degradación del DDT bajo condiciones aerobias, es muy estable, de difícil degradación y gran persistencia. Las concentraciones detectadas sobrepasan el valor máximo permisible ($0.00022 \mu\text{g L}^{-1}$) recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). El agua de este pozo no es apta para consumo humano, la población de la comunidad El Hatillo, está en riesgo por consumir agua contaminada por plaguicidas.

Probablemente la presencia de pp - DDE en el pozo pueda provenir por el manejo inadecuado del sello sanitario del pozo, el viento puede ser la vía de transporte del plaguicida producto de la deposición en el sello y es así como puede ingresar a las aguas subterráneas.

Referente a las aguas superficiales se detectó concentraciones (22.05 ng L^{-1}) de Lindano en los Puntos Estero El Caballo, en concentraciones que superan los valores recomendados por la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA). El Lindano solo desaparece del agua por la adsorción en sedimentos, la biodegradación y la adsorción por los peces a través de las agallas y la piel. El Lindano probablemente no provenga del lago Xolotlán, porque en muestreos anteriores no fue detectado

X.17.1. Sedimentos:

En sedimentos se detectó concentraciones significativas de pp- DDE, pp- DDD y pp- DDT en el punto Estero El Caballo y Laguna de Tisma.

La concentración de pp – DDE ($22.05 \mu\text{g.kg}^{-1}$) detectado en el punto Estero El Caballo sobre pasa el valor máximo recomendado por las Guías Canadienses de Calidad Ambiental ($1.42 \mu\text{g.kg}^{-1}$) para protección de la biota, y excede el valor máximo que supone un riesgo de exposición ($6.75 \mu\text{g.kg}^{-1}$). Basados en estas normas existe un 47% de probabilidad que el pp- DDE sea sorbido en los sedimentos, se libere y quede biodisponible en la columna de agua, lo que causa efectos adversos sobre la biota del Río Tipitapa.

Las concentraciones en los sedimentos de la Laguna de Tisma ($5.51 \mu\text{g.kg}^{-1}$), están sobre el valor máximo recomendado de pp- DDE. Esta concentración es menor al valor máximo que supone riesgo, sin embargo, se tiene un 20% de probabilidad de ser liberada de los sedimentos y afectar el ecosistema de Tisma.

Los valores de pp- DDD detectadas en el Estero El Caballo ($0.53 \mu\text{g.kg}^{-1}$), están bajo el valor máximo ($3.54 \mu\text{g.kg}^{-1}$) de las Guías Canadienses, por lo que no representa un riesgo para los organismos. En el Estero El Caballo se encontró una concentración de $1.95 \mu\text{g.kg}^{-1}$, supone un riesgo de 5% de ser liberado de los sedimentos.

En las muestras de aguas superficiales se detectó concentraciones de Lindano de $1.34 \mu\text{g/L}$ y pp – DDE, Anexo 5. El Lindano, muestra una baja afinidad para adherirse al suelo (Log Koc 3,04).

La Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios realizó muestreos en los años 2007, 2008 y 2010 en el Lago Xolotlán. En ninguna de estas campañas se detectó Lindano, el Lindano detectado no procede el Lago Xolotlán.

X.18. Plaguicidas organofosforados

Los plaguicidas organofosforados es el grupo más tóxico de los insecticidas en su género, atacan también a los mamíferos. Mucho de estos compuestos tales como el Paratión, son considerados como súper tóxicos, se requiere tan solo 2mg de Paratión para matar a un niño (Yu, 2004). Ninguno de los plaguicidas organofosforados fue encontrado ni en los pozos perforados ni en aguas superficiales.

X.18.1. Sedimentos:

Se detectaron los siguientes plaguicidas del grupo de organofosforados: Etión, Fentión y Forate. Las mayores concentraciones se encontraron en el Estero El Caballo, este grupo es poco soluble en agua. De los tres plaguicidas detectados, el Etión se encuentra en mayor concentración, este plaguicida en particular no está regulado en las Guías Canadienses de Calidad Ambiental (Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life). Sin embargo, dado que el grupo de los organofosforados son considerados como altamente tóxicos, es necesario evaluar el riesgo que pueda representar para el área del Estero. Tabla 20.

Tabla 20. Plaguicidas en Sedimentos en ng/mg.

Muestra	LD	Estero El Caballo	Laguna de Tisma
ETION	0.2	22.05	5.51
FENTION	22.44	0.53	0.16
FORATE		1.95	0.37

XI. Conceptualización de la dinámica de migración de sustancias desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca.

Basados en la información generada en este trabajo, se determinó que la dinámica de migración de las sustancias desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca, está controlada por la naturaleza geológica del área y la dinámica hidrológica del Río Tipitapa. La geometría del Lago Xolotlán en la naciente del Río Tipitapa constituido como la fuente de contaminación, está definida por el sistema de fallas Cofradía, la cual origina la formación de bloques estructurales que controlan la dirección y magnitud del flujo subterráneo. Esta característica, determina la migración de las sustancias, las cuales pueden representar contaminación, si sobrepasan la concentración establecida en Normas de Calidad de Agua.

Se ha evaluado el funcionamiento del sistema en el área del Lago Xolotlán y la naciente del río Tipitapa con la instalación de cuatro piezómetros de dos niveles. En estos se tomaron y analizaron parámetros físicos químicos de relevancia para el estudio. Los indicadores analizados fueron: pH, temperatura y conductividad eléctrica. Para definir la dirección de las aguas subterráneas y la relación entre el Lago, los acuíferos y el Río, se calculó el gradiente hidráulico vertical de los piezómetros instalados.

La conductividad eléctrica del Lago Xolotlán es mayor a 1220 $\mu\text{S}/\text{cm}$, si existe conexión entre el lago y el agua subterránea, es de esperar cambios en las columnas de agua de los piezómetros. El piezómetro PM1 – LXA fue instalado en la costa del Lago Xolotlán, sobre la estructura de la Falla Cofradía, a una profundidad mayor de 30 m. La profundidad proyectada fue de 40 metros, la cual no se alcanzó por inestabilidad del terreno. El Lago Xolotlán con una máxima profundidad de 19,5 metros (INETER, 2008), puede recargar los acuíferos adyacentes. Por esta razón se perforó a profundidades mayores a 30 metros.



Figura 70. Ubicación de los piezómetros.

Análisis de la Conductividad Eléctrica:

En la figura 71 se ha graficado la conductividad eléctrica y la profundidad de medición: Los registros medios de la CE en los PM – LXA y PM1- RTA fueron de 620 y 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Bajo estas condiciones, se descarta la influencia de las aguas contaminadas del lago en las aguas subterráneas adyacentes donde se instalaron los piezómetros.

En relación al PM2 – RTA, localizado en el margen Sur del Río Tipitapa, cerca de la zona de descarga del Lago Xolotlán, las condiciones cambian completamente. En el perfil química (Figura 71) se evidencia el incremento significativo de la CE (1020 - 820 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en relación al resto de piezómetros, indicando percolación del agua del Río Tipitapa, influenciado por la calidad del Lago Xolotlán. Este comportamiento de la CE es coherente con la formación de bloques tectónicos, cuya estructura está gobernando la relación entre el Lago Xolotlán, el Río Tipitapa y de los acuíferos adyacentes. El gradiente hidráulico calculado en este piezómetro fue de 0.003 y la dirección del gradiente determinó una relación de recarga del agua del Río Tipitapa al agua subterránea (Ver Figura 23).

El Piezómetro PM3- RTA ubicado en el área de los Terales de Tipitapa, se registró valores de CE mayores a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, originada por la mineralización de sus aguas. Este PM se localiza en un área afectada por el termalismo.

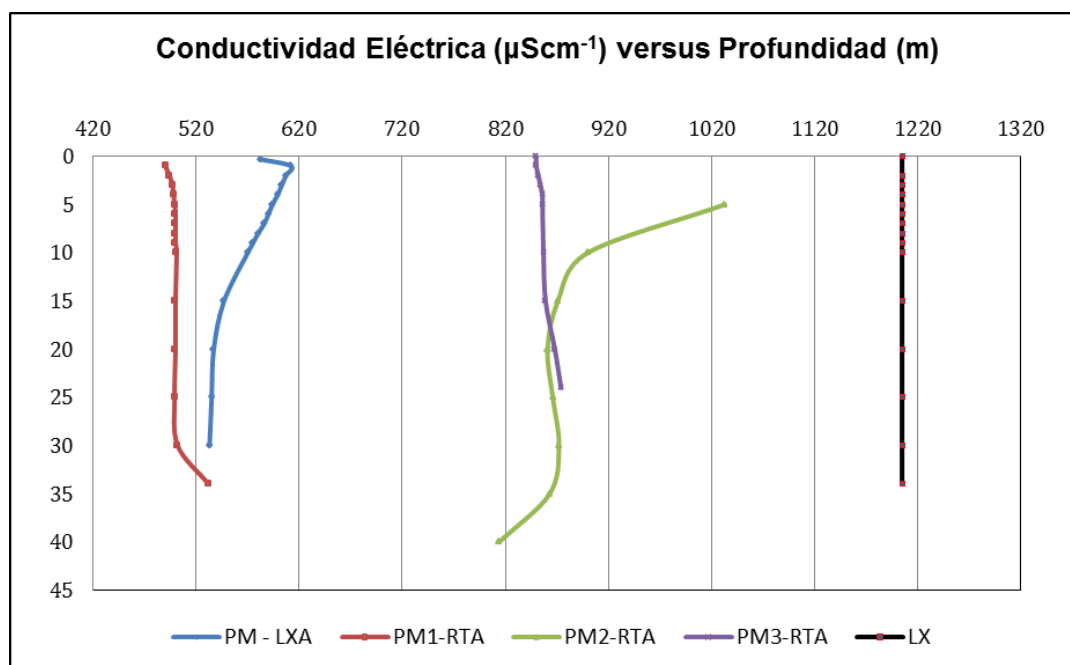


Figura 71. Perfil físico químico que muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica en la columna de agua de los piezómetros.

Análisis del pH:

A medida que las aguas subterráneas tienen un mayor recorrido, el pH tiende a incrementarse, originado por el consumo de iones hidronios (H^+) durante las reacciones químicas que ocurren por la interacción de las aguas subterráneas con el material geológico. El lago Xolotlán por ser una zona de descarga regional y tener una alta productividad tiene un pH básico de 8.75 unidades. El piezómetro PM1 – RTA, que intercepta las aguas del acuífero Tipitapa - Malacatoya tiene un pH menor a 7.50 unidades, característicos de aguas de recarga local, con poco recorrido, la naturaleza hidroquímica de este punto corresponde a aguas Bicarbonatadas Cálcicas (Tabla 11, Figura 33). El piezómetro PM2- RTA que intercepta la descarga del acuífero de Las Sierras difiere en una unidad logarítmica menor que el lago Xolotlán. La composición y naturaleza química de las aguas del PM2- RTA denotan una mezcla, tal como la confirma su naturaleza hidroquímica de Bicarbonatada Sódica Clorurada. Por ejemplo, los contenidos de cloruro (118 mgL^{-1}) son menores respecto al Xolotlán (139.7 mgL^{-1}) pero mayores a los pozos perforados en los alrededores de 500m del área, como por ejemplo El pozo Perforado Enacal Ciudadela #1 (2.72 mgL^{-1}) o el pozo Perforado Las Majadas (14.45 mgL^{-1}). Figura 72.

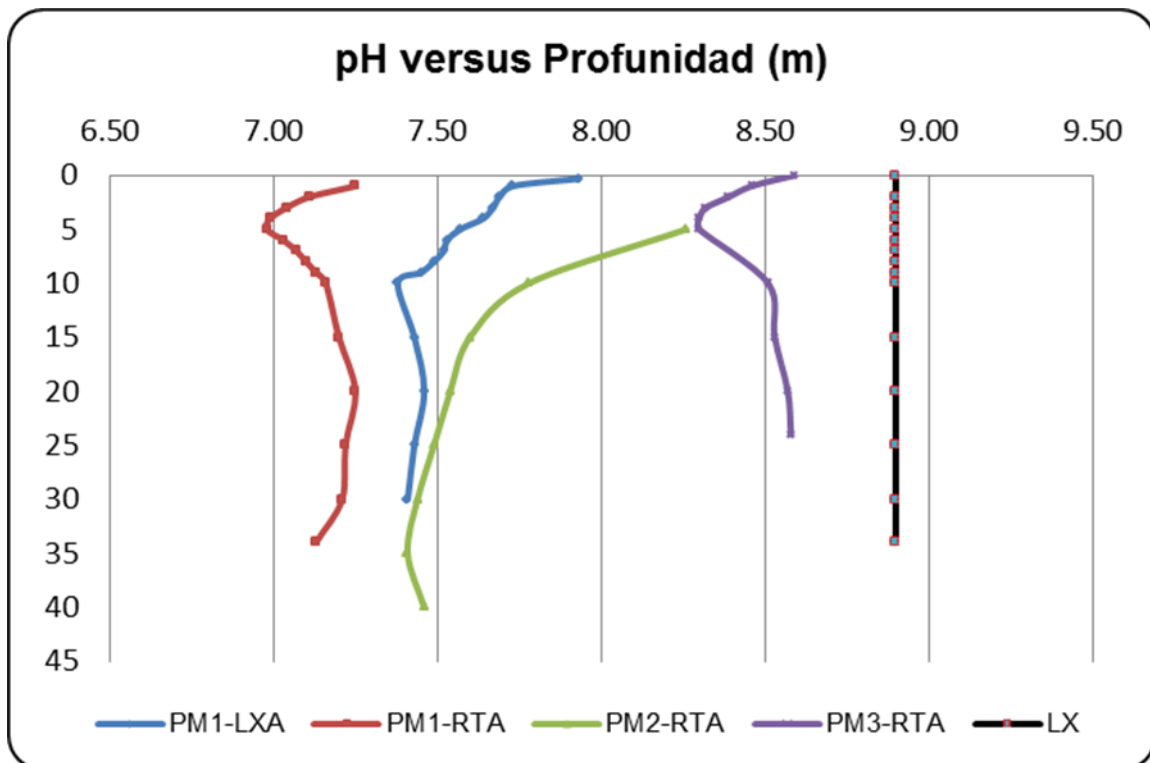


Figura 72. Perfil que muestra el comportamiento del pH, profundidad contra el pH en los piezómetros.

Análisis de la temperatura

Los rangos de temperatura medidos en los piezómetros oscilaron entre 29 °C a 36 °C. En el punto PM – LXA se midió un gradiente de temperatura cada 5 metros. Se determinó un rango de temperatura desde 30°C en la superficie (0,5 m) a 34°C a la máxima profundidad de perforación (32m). Este es el piezómetro más cercano al Lago Xolotlán

Las mayores temperaturas se registraron en el piezómetro PM3- RT, muy cercano al área de los Termales de Tipitapa y en los piezómetros PM LXA y PMLXB, construido sobre el sistema de Fallas Cofradía. Estas temperaturas son atribuidas a la actividad tectónica desarrollada en el área y el aporte geotermal.

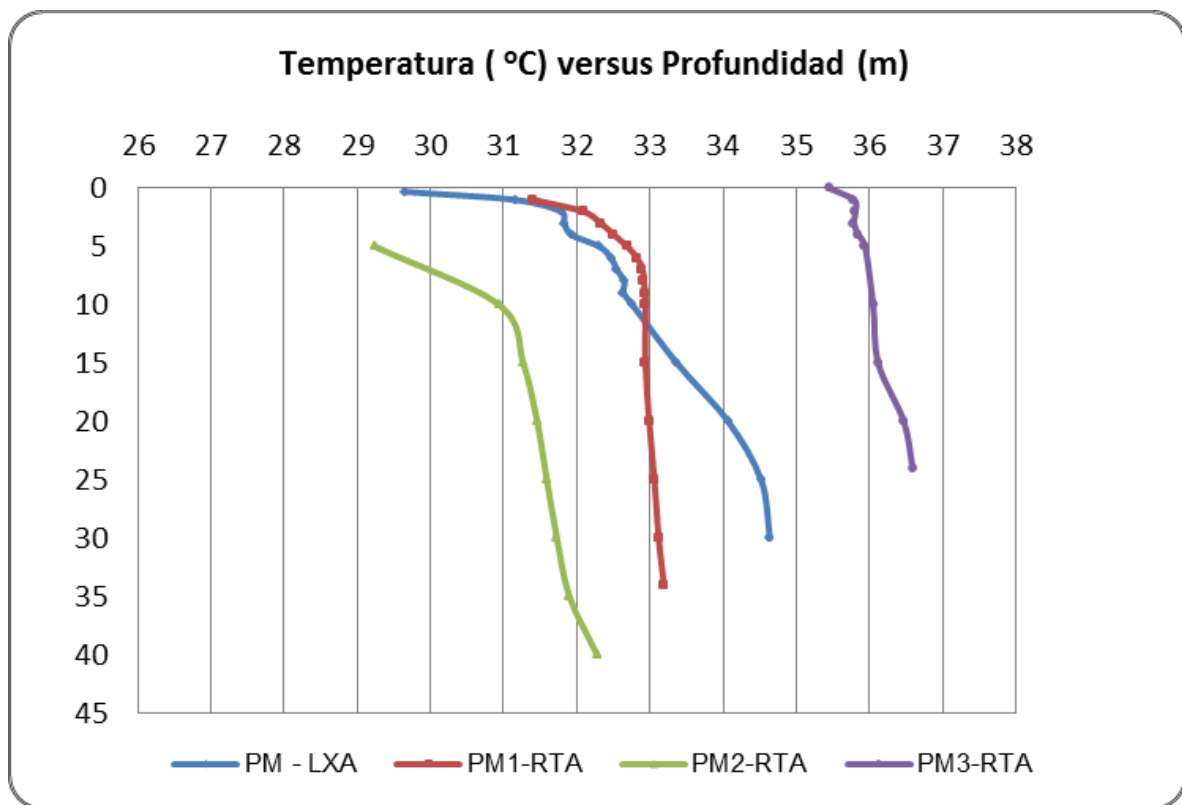


Figura 73. Perfil que muestra el gradiente de la temperatura.

XII. Propuesta de Modelo Conceptual

La hipótesis estudiada en esta tesis manifiesta que el lago Xolotlán recarga sus aguas contaminadas a los acuíferos adyacentes de Las Sierras y Tipitapa Malacatoya en el área que nace el Río Tipitapa (59 6828E- 1349035 N), basado en los resultados de la hidroquímica, la isotopía y la geología del área generada en esta investigación se descarta la conexión hidrogeológica entre los lagos Xolotlán y Cocibolca, los acuíferos de la zona interlagos no son recargados por el lago Xolotlán y se propone el siguiente modelo conceptual del área :

XII.1. Dinámica de Flujo

Área de recarga: El río Tipitapa, el cual corre sobre la Formación Las Sierras, es interceptado en su nacimiento en el lago Xolotlán por un sistema de fallamiento con dirección E – NE, el cual, es interceptado por otro sistema de fallas de dirección N - NE a NE, creando una morfo tectónica de bloques (Figura 23), que gobierna el movimiento de las aguas subterráneas y por tanto, es una barrera que limita la percolación de las aguas contaminadas del Xolotlán hacia los acuíferos profundos y su descarga hacia el lago Cocibolca. .

Basado en la hidroquímica de los pozos perforados la recarga del acuífero regional Las Sierras y el acuífero Tipitapa Malacatoya, no solo es regional, sino también ocurre a nivel local y tiene por límite la cota de 50 m.s.n.m.

Producto de la tectónica del río que originan cambios estructurales a lo largo de su cauce, se identificó a través de los resultados de la geología, hidroquímica y de la isotopía la formación de una zona hiporreica o de transición a partir de las coordenadas 606 141 y 607 230 E; 1343 014 y 1343 500 N. El contenido de isótopos estables en las muestras tomadas en los mini piezómetros, muestran claramente la mezcla de las aguas superficiales y subterráneas (Tabla 14). Por un lado se determinó el enriquecimiento de las aguas superficiales ($-1.8 \delta^{18}\text{O}$, $-13.0 \delta^2\text{H}$) y el empobrecimiento de los pozos perforados (Tabla 15) cuyos valores oscilan entre $-6.2 \delta^{18}\text{O}$ y $-40.0 \delta^2\text{H}$. Los mini piezómetros tienen un contenido isotópico que oscila entre $-4.1 \delta^{18}\text{O}$ a $-28.3 \delta^2\text{H}$ (Figura 42).

La Figura 74 muestra el mapa isotópico del área, en el cual se delimita la zona hiporreica. Estos datos también coinciden con los registros de la conductividad eléctrica y naturaleza hidroquímica analizados en los pozos perforados, pozos excavados, muestras en el río y en los minipiezómetros (tablas 8, 9, 10, figura 32, 33, 34 anexo 2, anexo 3). . En la zona hiporreica , existen mezclas de las aguas del Río Tipitapa, que transporta las aguas contaminadas del Lago Xolotlán, con las

aguas subterráneas de descarga, originándose transporte de metales como el aluminio y el arsénico en los pozos excavados ubicados en los márgenes Norte y Sur del río. .

Área de Descarga:

Regionalmente el río Tipitapa y la laguna de Tisma son área de descarga de los grandes acuíferos Las Sierras y Tipitapa Malacatoya, es decir, el flujo que mantendrían proviene de aguas subterráneas, sin embargo, en el año 2011 y 2012 producto de la naciente del río en el lago Xolotlán, según la isotopía, el Río transporta solamente las aguas contaminadas el lago Xolotlán y el caudal que Tisma mantuvo en ese período de tiempo provenía solamente del Xolotlán.

A pesar que el acuífero Las Sierras presenta condiciones libre, se observó confinamiento en el área de Tisma (608410/1335565) la Hacienda El Quemado (603406/1346920), Hacienda Pasquier (603794/1347618), El Timal (607976/1349618 y Hacienda San Juan (605172/1344887)

Niveles de agua

Los niveles de agua medidos en 22 pozos excavados localizadas alrededor de cauce del Río Tipitapa y Paso Panaloya oscilaron entre casi a nivel del suelo a 14.5m. Las mayores profundidades del NEA se midieron en el área de Tipitapa (14.5 a 5.9 m). Los menores niveles se registraron en el área de los humedales de Tisma, prácticamente en esta época los niveles de agua están a nivel del terreno o sobre éste.

A medida que se descende en altitud, los niveles también disminuyen, reflejando relación con la topografía. En el área de La Carbonera y San Juan de la Plywood se midieron niveles entre 1.36 a 4.42 m. Específicamente en el sector Sur del lago Xolotlán, conocido como La Bocana el nivel de agua está a 1.39 m, este dato contrasta con el comportamiento de la zona de interlagos y tal como se ve en el mapa, la Falla Cofradía separa las áreas, lo que sugiere que son sistemas hídricos diferentes. Figura 21.

En relación a los pozos perforados, de los pocos puntos medidos, se observó que el agua afloraba al nivel del terreno, este comportamiento sugiere la existencia de confinamiento en ciertas áreas. El artesianismo fue observado en el área de la Hacienda El Quemado, Hacienda Pasquier, El Timal y Hacienda San Juan, ver figura 22.

XII.2. Hidroquímica e isótopos

La zona de interlagos se inserta dentro de dos acuíferos importantes, el Acuífero Tipitapa – Malacatoya y el Acuífero Regional Las Sierras. El gráfico de Piper, muestra la predominancia de tres tipos hidroquímicos: Aguas Bicarbonatadas Sódicas, Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas y Cloruradas Sódicas.

Las aguas del acuífero Las Sierras son Bicarbonatadas Sódicas debido a su mayor recorrido, tiempo de residencia y contacto con el material acuífero, sufriendo procesos de intercambio de bases, Sin embargo, el flujo profundo del acuífero es influenciado por la actividad termal, en las áreas comprendidas en el Hatillo ubicado en la costa NW del lago Cocibolca (618133-1332832), y Tisma (608447-1335741), en estos pozos prevalece la naturaleza Clorurada Sódica, y en ellos se registró temperaturas de 34.8 °C y 37 °C, respectivamente.

El termalismo también está aportando flúor a las aguas subterráneas, en tres pozos perforados que son utilizados para abastecimiento de agua a pequeñas poblaciones se registró concentraciones mayores a 1.90 mgL⁻¹.

En los flujos profundos y subsuperficiales se detectó arsénico; en los pozos perforados las concentraciones están entre 7.07 a 29.38 µgL⁻¹, los pozos que registraron las mayores concentraciones de As se localizan en el área de la comunidad La Carbonera (604741-1347 965). Tanto en los piezómetros instalados en las costas del Lago Xolotlán como en los minipiezómetros construidos en las costas del lago Cocibolca se detectó concentraciones entre 2.67 a 19.7 µgL⁻¹, el punto que registró la mayor concentración se ubica en la costa NW del lago, cerca de la desembocadura del Río Malacatoya y el punto que registró menor concentración fue en el piezómetro instalado en el margen Sur del Río Tipitapa, alineado y cercano al área de los Termales de Tipitapa, sobre el sistema de Fallas Cofradía.

Por otro lado, El acuífero Tipitapa Malacatoya muestra aguas Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas a Sódicas, las cuales son aguas jóvenes, de recarga reciente. Esto indica que en esta área juega un rol importante la recarga local.

Las actividades antropogénicas tienen influencia significativa en el flujo subsuperficial, sobre todo en el flujo de descarga en el área de Paso Panaloya, Hacienda San Pedro y cerca de la desembocadura del Río Malacatoya al Lago Cocibolca. Las muestras tomadas en los minipiezómetros instalados en estas zonas tienen naturalezas cloruradas sódicas y bicarbonatadas sódicas cloruradas,

y en ellos se registró las mayores concentraciones de cloruro, sulfatos y otras sales, con una pésima calidad de agua.

Basados en la en el contenido y distribución isotópica y en las características hidroquímicas de las aguas subterráneas y superficiales, se observa con claridad que las aguas del Lago Xolotlán no ejercen influencia directa sobre los acuíferos principales de Las Sierras y Tipitapa Malacatoya, las muestras presentan un empobrecimiento en relación al lago Xolotlán (Figura 74).

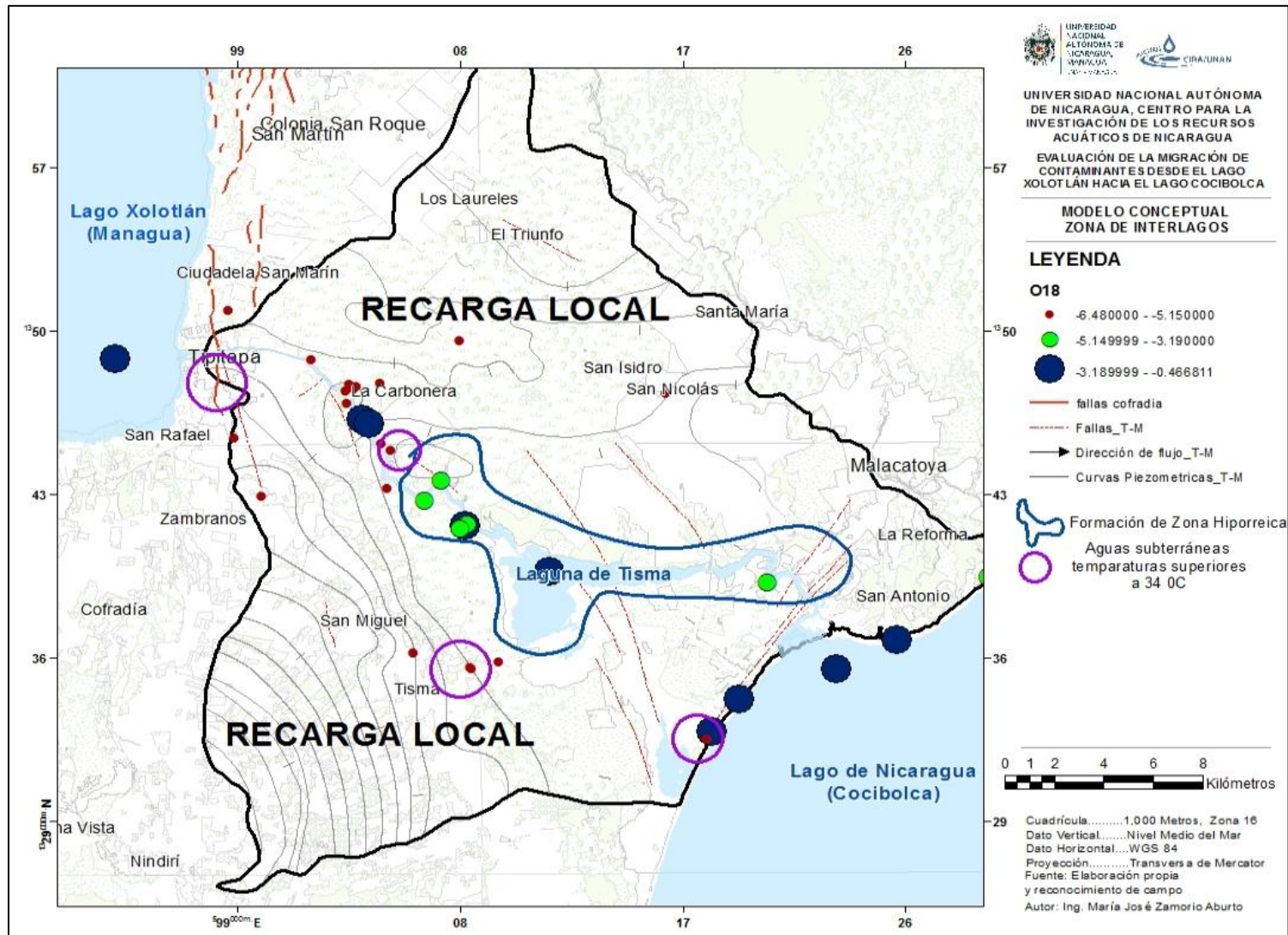


Figura 74. Modelo Conceptual de la zona interlagos

XII.3. Carga de Migración de compuestos.

Según los resultados de este estudio existe una migración de ciertos compuestos a nivel superficial desde el Lago Xolotlán en dirección al Lago Cocibolca a través del Río Tipitapa. El área de humedales de Tisma sirve de amortiguador de estas sustancias. Sin embargo, a nivel subterráneo bajo las condiciones de este estudio no se encontró evidencia de transporte de contaminantes.

En las muestras de agua tomadas en los mini piezómetros se observó la formación de una zona hiporreica, la cual se define como una zona de transición localizada debajo del cauce del Río Tipitapa y tiene características químicas muy particulares que resulta en la mezcla de las aguas de descarga de los acuíferos Las Sierras y Tipitapa Malacatoya al Río Tipitapa. Esta condición fue observada en los tipos hidroquímicos (Tabla 11) y en las concentraciones de sólidos totales disueltos.

Desde el lago Xolotlán migran los contaminantes como el arsénico y el boro, los cuales son mostrados en la siguiente tabla. Para cuantificar la carga contaminante que migra a través del Río se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Carga Contaminante} = \text{Concentración} * \text{Caudal} * 0,0864$$

Donde:

Carga contaminante (en Kg d^{-1}), Kilogramos por día.

Concentración (en mg L^{-1})

Caudal (en l s^{-1})

El valor 0,0864 es un factor de conversión para pasar de mg/s a Kg/d .

En este estudio se utilizó la Curva de Gasto elaborado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), para determinar el caudal que pasa desde el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca, durante el período de estudio. INETER (2010) determinó un caudal de **$39.649 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$** o **$39\ 649 \text{ l s}^{-1}$** . Anexo 9.

Los resultados de aplicar la ecuación de contaminantes se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Carga Contaminante.

Compuesto/ Elemento	Concentración salida Río Tipitapa (mgL⁻¹)	Carga contaminante kg d⁻¹	Carga contaminante T d⁻¹
Cloruros	139.7	478566.60	478.57
Sulfatos	75.71	259357.75	259.36
Sodio	209	715965.78	715.97
Flúor	0.7	2397.97	2.40
Arsénico	25	85641.84	85.64
Boro	1.41	4830.20	4.83
Aluminio	400	1370269.44	1370.27

Las cargas contaminantes son significativas y es necesario realizar estudios que determinen el efecto a corto y largo plazo de las sales de cloruros, sulfatos, sodio y de los metales y metaloides como el Arsénico y el Boro. A nivel superficial el lago Xolotlán representa la entrada más importante de Arsénico y Flúor al Cocibolca, los cuales en concentraciones como las registradas en el lago Xolotlán son una amenaza para la calidad del agua del Cocibolca.

No obstante, en la zona de estudio, se detectó contaminación por Arsénico y Flúor en los principales pozos de abastecimiento, se estableció que sus orígenes no provienen del Lago Xolotlán.

XII.4. Fuentes de contaminación puntual

El Río Tipitapa no sólo transporta las aguas contaminadas del Lago Xolotlán, sino que también es un medio para la contaminación originada por las actividades de la población del municipio de Tipitapa, Paso Panaloya y el resto de poblaciones aledañas. Así mismo los residuos agrícolas y ganaderos originados por el desarrollo de actividades pecuarias en la zona interlagos, tienen su destino final en el Río Tipitapa.

En las giras de reconocimiento y muestreos se observó que el río Tipitapa es utilizado para el vertido de las aguas residuales domésticas sin tratar de la ciudad de Tipitapa. Esto origina un aporte de carga contaminante orgánica y bacteriológica principalmente. Esta contaminación altera la calidad de las aguas subterráneas someras en los alrededores del Río.

En las márgenes del Río se desarrolla la ganadería y agricultura. Se cultiva arroz y maní que aportan contaminación orgánica y química. Para el caso del cultivo del arroz, al NE del río, drenan aguas con residuos de plaguicidas y nutrientes empleados en la agricultura. En esta zona se detectaron trazas de contaminantes orgánicos en sedimentos, los cuales no provienen del lago Xolotlán, Figura 75.

También se determinaron basureros clandestinos que contienen residuos de los procesos de telares de zonas francas aledañas. A esto se suma los basureros que la población crea para depositar sus desechos.

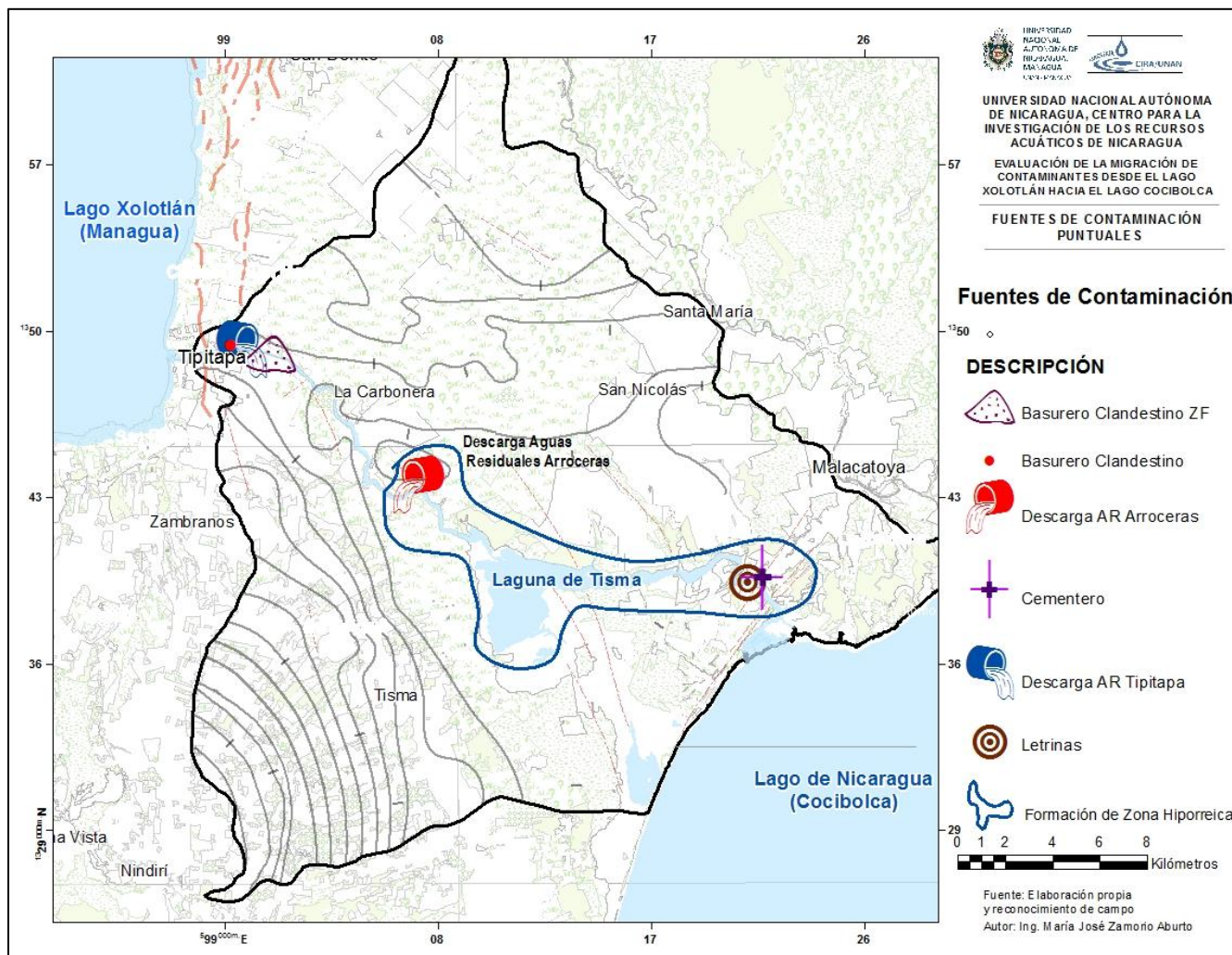


Figura 75. Focos de Contaminación detectadas en el reconocimiento de campo.

XIII. Recomendaciones a la Gestión de la Zona Interlagos

La zona de interlagos presenta un sistema hidrológico e hidráulico altamente complejo. En el centro de la zona se emplaza el Río Tipitapa, el cual en ocasiones drena agua del Lago Xolotlán. Permanentemente es la zona de descarga de los acuíferos Las Sierras al SO y Tipitapa Malacatoya al NE. Este río drena directamente a la Laguna de Tisma, el cual ha sido declarado sitio Ramsar. Esta complejidad hídrica, le confiere características privilegiadas para la explotación sostenible de recursos hídricos y del humedal. El uso del agua de la zona es principalmente para riego de cultivos.

Estas mismas características le confieren vulnerabilidad ante la contaminación tanto natural como de origen antropogénico. Los acuíferos en general son libres, con recarga local y en la zona central el nivel del agua es somero, con una zona no saturada permeable y de poco espesor. La calidad del agua del Lago Xolotlán es afectada por las sustancias generadas por procesos volcánicos activos.

Toda la microcuenca del lago Xolotlán y la zona interlagos es utilizada para cultivos con aplicación de agroquímicos. El agua servida de la ciudad de Managua, con tratamiento secundario es descargada al Lago Xolotlán. Existen zonas de ganadería intensiva. En las giras de reconocimiento se observó la existencia basureros clandestinos, zonas de cultivo con aplicación de agroquímicos, zonas ganaderas, fecalismo al aire libre. Todo esto genera sustancias que lixivian hacia el acuífero somero deteriorando la calidad de agua.

El río principal de la zona de los interlagos, el Río Tipitapa es utilizado para descargar las aguas residuales de la ciudad de Tipitapa, así como descargas de aguas provenientes de canales arroceros. Las muestras de agua presentaron concentraciones de algunos plaguicidas que representan riesgo para el ecosistema de La Laguna de Tisma.

El sistema Laguna de Tisma, declarado como sitio Ramsar 1141 es uno de los ecosistemas más vulnerables que está siendo impactado cuando se produce la conexión superficial con el Lago Xolotlán a través del Río Tipitapa.

En los análisis isotópicos, fue evidente que actualmente el mayor aporte hacia los humedales lo constituye el flujo del Río Tipitapa, el cual ha estado descargando agua del Lago Xolotlán.

Es necesario tomar acciones que detengan la contaminación de origen antropogénico para garantizar la salud del ecosistema de Tisma y de los acuíferos de la zona interlagos en cuanto a contaminación bacteriana y agroquímico. Es indispensable que las autoridades competentes aseguren la alimentación del humedal con la descarga natural de las aguas subterráneas y del lago con agua de mejor calidad que la actual.

Las autoridades como MAGFOR, MARENA, INTA y MINSA, así como los actores del sector productivo, deben trabajar en la aplicación de técnicas más ecológicas, así como garantizar un tratamiento adecuado de residuos sólidos y líquidos. La descarga de las aguas residuales de la ciudad de Tipitapa debe ser previamente tratada para disminuir y/o eliminar la carga de contaminantes orgánicos y biológicos.

Las poblaciones de la zona cercana a la desembocadura del Río Tipitapa-laguna de Tisma al Lago Cocibolca deben mejorar el sistema de saneamiento y disposición de desechos sólidos y líquidos, ya que esta es un área de descarga de aguas subterráneas muy susceptible a la contaminación.

Es necesario realizar una investigación a detalle de carácter social, ambiental y económico en esta área a fin de conocer toda la situación histórica y actual. Esto definirá a detalle el potencial de recursos naturales y permitirá establecer un plan de acción comunitario participativo para la recuperación ambiental de la zona

Los principales elementos de enfoque de estudio se detallan a continuación.

- 1 Definición de la Vulnerabilidad – Modelo Hidrológico e Hidrogeológico para determinar el comportamiento del sistema tanto estacional como la respuesta a la vulnerabilidad y el cambio climático.
- 2 Estudio de Desechos Sólidos y Líquidos para definir la Carga Real y el manejo de los mismos.
- 3 Levantamiento Socioeconómico de la Zona
- 4 Estudio de Impacto a la Salud de los contaminantes encontrados.
- 5 Definición de Servicios Ambientales
- 6 Diseño de sistemas de saneamiento integrales para la disposición de los residuos sólidos y líquidos.

XIV. CONCLUSIONES

Basados en la caracterización hidroquímica del agua, la geología y los análisis isotópicos de los pozos perforados, pozos excavados, aguas superficiales y minipiezómetros muestreados en noviembre de 2011, se descarta la conexión subterránea entre el lago Xolotlán hacia el lago Cocibolca. Por ende, la migración de las sustancias desde el Lago Xolotlán hacia el Lago Cocibolca, solo ocurre a nivel superficial, controlada por la naturaleza geológica del área y la dinámica hidrológica del Río Tipitapa. No obstante el flujo es mitigado por la Laguna de Tisma, aminorando significativamente las concentraciones que finalmente llegan al Cocibolca. A nivel superficial desde el Lago Xolotlán migran los contaminantes como el arsénico y el boro,

Sin embargo, el río Tipitapa que conecta superficialmente ambos cuerpos de agua, origina la formación de una zona hiporreica a partir de las coordenadas 606 141 y 607 230 E; 1343 014 y 1343 500 N definida como un área de transición que convergen y se produce intercambio entre las aguas superficiales del río Tipitapa y las aguas subterráneas y que requiere ser investigada a detalle para determinar los cambios que pueden originar sobre la calidad de los flujos subsuperficiales.

En referencia a la naturaleza geológica del río Tipitapa, este se emplaza a lo largo de un sistema de fallamiento de deslizamiento horizontal derecho, interceptado por fallas normales de orientación preferencial NW. El río transcurre en dos ambientes tectónicos, uno extensional característico de bloques levantados y hundidos y el otro compresional a partir de Hato Grande, donde cambia el régimen de esfuerzo complexional que se manifiesta por un levantamiento morfo tectónico. Los límites de estos bloques controlan la relación descarga y recarga de las aguas subterráneas, lo cual converge a un sistema acuífero – fractura de fallamiento transversal NE

De acuerdo al análisis de los isótopos estables, el lago Xolotlán no contribuye a la recarga de los acuíferos adyacentes, es decir hidrogeológicamente los acuíferos en las zonas interlagos no son alimentados por las aguas contaminadas del Xolotlán. Las muestras colectadas en los pozos perforados que atraviesan las formaciones acuíferas están empobrecidas en Oxígeno 18 y Deuterio ($\delta^{18}\text{O}$ -6.2, $\delta^2\text{H}$ -41.9), mientras que las del Lago son enriquecidas por evaporación ($\delta^{18}\text{O}$ -1.8, $\delta^2\text{H}$ -13.0).

En el área interlagos predominan mayoritariamente tres tipos hidroquímicos: Bicarbonatadas Sódicas, Bicarbonatadas Cálcicas Magnésicas y Cloruradas Sódicas. El flujo profundo del acuífero Las Sierras es influenciado por diferentes

procesos subvolcánicos como el termalismo manifestado en el área de Tipitapa, Tisma y en la costa Suroeste del Lago Cocibolca, con el aporte de Arsénico, Flúor, Boro, Cloruros y otros elementos. En estas áreas se detectó temperaturas superiores a 34°C.

Tanto en los flujos profundos como en los subsuperficiales se detectó arsénico en un rango entre 7.07 a 29.38 μgL^{-1} . De las 21 muestras analizadas para metales pesados y metaloides se detectó que tres de los pozos utilizados para abastecer agua a las comunidades son afectados por concentraciones de Arsénico y Flúor que sobre pasan los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud y las Normas CAPRE para agua de consumo humano

Las actividades antropogénicas tienen influencia significativa en el flujo subsuperficial, sobre todo en la zona de descarga al Lago Cocibolca

En la zona interlagos juega un rol significativo la recarga local sobre todo en el acuífero Tipitapa Malacatoya y a partir de la cota de 50 m.s.n.m. en el acuífero Las Sierras.

El Río Tipitapa cuando fluye superficialmente no sólo transporta las aguas contaminadas del Lago Xolotlán, sino que también es un medio para la contaminación originada por las actividades de la población del municipio de Tipitapa y el resto de poblaciones aledañas. Así mismo los residuos agrícolas y ganaderos tienen su destino en el Río Tipitapa y posteriormente a la Laguna de Tisma, lo cual eventualmente puede sobrepasar su capacidad de carga y luego, llegar al lago Cocibolca. De los plaguicidas organoclorados, organofosforados, triazinas y herbicidas analizados, se detectó concentraciones de Lindano (22,05 ngL^{-1}) en los Puntos Estero El Caballo. Esta concentración supera los valores recomendados por la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA) para la protección a la vida acuática. El Lindano no procede del Lago Xolotlán.

XV. ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Esta investigación se desarrolló bajo las siguientes limitaciones y alcances:

- El análisis de los isotopos fue realizado en noviembre de 2011, finalizando el período lluvioso.
- No se construyó una línea meteórica local para la zona interlagos.
- El análisis físico químico, metales pesados y plaguicidas se realizó en marzo de 2012.

A pesar que no se realizó un muestreo en la época de verano, se analizó la basta información oficial de antecedentes generada por al Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), los estudios realizados en por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA) y el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA – UNAN) en la zona interlagos en los años 2007 y 2010.

XVI. RECOMENDACIONES

Se recomiendan investigaciones a detalle para determinar el origen y distribución del Arsénico detectados en los pozos perforados y piezómetros. Es importante en este estudio, establecer la especiación de Arsénico y evaluar el riesgo de exposición de la población por consumir el agua con altas concentraciones de este metaloide.

Realizar un segundo muestreo en la época de verano (marzo –abril) para analizar el contenido isotópico en la zona interlagos y la construcción de la línea meteórica local del área.

El agua que toman los pobladores de Paso Panaloya y el Timal Cuadrante 85 contiene concentraciones significativas de Arsénico, se recomienda realizar un segundo muestreo y un estudio de salud pública para determinar cuál ha sido el impacto de la ingesta de agua contaminada por Arsénico a lo largo del tiempo. También es necesario diseñar un sistema que potabilice el agua de estas comunidades.

Es importante que las autoridades locales consideren las causas de la fluorosis cuidadosamente y elijan los medios más adecuados para abordar la exposición al exceso de flúor teniendo en cuenta las condiciones y las limitaciones locales.

El gobierno del municipio de Tipitapa, Tisma y Malacatoya en conjunto con la población debe elaborar y ejecutar estrategias para el manejo de los desechos sólidos y aguas residuales que son descargadas al río sin ningún tratamiento.

Realizar una investigación en la Laguna de Tisma que evalúe el efecto del escurrimiento del lago Xolotlán sobre este ecosistema. Empelar códigos numéricos para predecir el grado de respuesta a futuro.

Realizar estudios geológicos y ensayos geofísicos profundos, así como perforación de pozos de observación totalmente penetrantes para delimitar el basamento hidrogeológico del área de Interlagos o Planicie de Tipitapa. Es necesario además de disponer de estudios para determinar características hidráulicas e hidroquímicas a profundidades mayores a los 200 metros.

XVII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Amsterdam: CRS Press.
- Arriola, M. (2012). *Modelamiento Numérico de la Dinámica de Flujo Subterráneo del Acuífero de Tisma, para Evaluar la Conectividad entre los Lagos Xolotlán y Cocibolca*. Managua: Centro Para la Investigación en Recursos Acuáticos.
- Baskaran S, Ransley, T, Brodie R.S. , and Baker, P. (s.f.). Investigating Groundwater-River Interactions Using Environmental Tracers.
- Calderón, H., & Flores, Y. (2011). Evaluación de la Dinámica de la Laguna de Apoyo mediante Trazadores Isotópicos y Geoquímicos. *Universidad y Ciencia*, 5(8), 22-26. <https://doi.org/10.5377/uyc.v5i8.315>
- CAPRE (1994). Normas de Calidad de Agua para Consumo Humano (Primera ed.). San José, Costa Rica: Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.
- CCME. (2004). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Clark, I. and Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press LLC.
- Chan, Montgomery. (1981). Informe sobre la Investigación de Fuentes Potenciales de Abastecimiento de Agua para Managua.
- Clark Ian and Aravena Ramon. (2005). *Environmental Isotopes in Ground Water Resource and Contaminant Hydrogeology*.
- Corporation In Joint Venture With Marshall & Stevens Incorporated and Internacional Aero Services Corporation. (1969). *The Waters Resource of Nicaragua*.
- Delgado, V. (2003). *Groundwater Flow System and Water Quality in a Coastal Plain Aquifer in Northwestern Nicaragua*. Thesis Master: University Of Calgary.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. (1998). *Physical and chemical hydrogeology volume 1*. Wiley.

- EPA, 2002. *National Primary Drinking Water Regulations. In Current Drinking Water Standards.*
- EPA, 1999. *National Recommended Water Quality Criteria for Priority Toxic.*
- Pollutants. In National Recommended Water Quality Criteria – Correction. EPA822-Z-99-001.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater.* Prentice Hall, Inc.
- Fetter, C.W., 1994. *Applied Hydrogeology.* Third. Edition. Prentice-Hall, Inc.
- Fetter, C.W., 1999. *Contaminant Hydrogeology.* Second Edition. Prentice Hall.
- Funari, E., Donati, L., Sandroni, D., and Vighi, M. 1995. *Pesticide levels in groundwater: Value and limitations of monitoring. Chapter 1: 3-44. In: Pesticide risk in groundwater. Editors: Vighi, M., and Funari, E.* CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, USA, 275p.
- Hem, D. J., 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water.* Third Edition. In: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper2254.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 2009 y Organismo Internacional de Energía Atómica. *Estudio Caracterización Hidrogeológica e Isotópica del Lago de Nicaragua.*
- INETER, 1996. Departamento de Hidrogeología. *Estudio Isotópico Lago De Managua Cooperationwith OIEA; Sección de Hidrología Isotópica.* ProyectoNIC/08/009.
- INETER, 2010. *Identification and assessment of hydrological flows between the lakes of Managua and Nicaragua, Applying Nuclear Techniques for the Development of a Management Plan for the Watershed of the Great Lakes.* Name of OIEA-Experto Hidrogeólogo Sergio Iriarte Díaz.
- INETER, 2011. *Informe preliminar Proyecto NIC 08/012, Estudio Caracterización Hidrogeología e Isotópica del Acuífero Tipitapa-Malacatoya en zona del Estrecho Interlagos.*
- Krásný, J. (1998). *Caracterización Hidrogeológica e Hidroquímica de la Región Pacífica de Nicaragua.* In G. H. Jyry Krásný, *Caracterización Hidrogeológica e Hidroquímica de la Región Pacífica de Nicaragua.* Managua: INETER.

Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall.

Martinez W., 1992: *Tectonic and Volcanic Geology of the Nejapa Volcanic Alignment in Managua, Nicaragua*. Niigata University. PhD Thesis, Japan.

Mifflin, M. D. (1968). *Delineation of Ground Water Flow Systems in Nevada*. . Obtenido de WorldCat: www.pbadupws.nrc.gov.

Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, Insituto Nicarguese de Estudios Territoriales y Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos. *Proyecto: Evaluación del posible impacto de la calidad del agua del lago Xolotlán sobre el Río Tipitapa y el area inmediata en el Lago Cocibolca*. Diciembre, 2010.

Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1987. Guías para la calidad del agua potable. 2ª ed., Vol. 2, Criterios relativos a la salud y otra información de base

Parello, F., Aiuppa, A., Calderón, H., Calvi, F., Cellura, D., Martínez, V., y otros. *Geochemical Characterization of Surface Waters and Groundwater Resources in the Managua Area (Nicaragua, Central America)*. Applied Geochemistry, 23 (4), 914-931.

Plata, A., Araguás, L., & Peña, R. (2000). Hispagua. Recuperado el Julio de 2013, de http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/2001/121/articulo1/articulo.html#titulo

Rozanski, K, Araguás-Araguás, L., and Gonfiantini, R.; 1993. *Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation*. In: Continental Isotope Indicators of Climate Americal Geophysical Union Monograph.

Rubí, C. 2011. *Tectónica Activa en la Cuenca de Managua: Paleosismicidad de la Falla Cofradía*.

Salvatierra, T. (2007). *Calidad de las Aguas de la Laguna de Tisma*. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. .

Tahal, P. (1978). *Informe Proyecto de Riego Tipitapa - Malacatoya*.

Weight , W and Sonderegger, J. (2000). *Manual of Applied Field Hydrogeology*. New York: McGraw Hill Companies.

XVIII. ANEXOS

Anexo1: Matriz de coeficientes de correlación de mili equivalentes. Calculado en Aqua Chem 3.70 a partir de los resultados de análisis físico química de las muestras de aguas subterráneas y superficiales de la zona interlagos.

	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	K ⁺
Na ⁺	1	-1.40E-02	0.276	0.893	0.781	0.961	-2.90E-02	-0.294	-0.248	0.48	7.30E-02
Ca ²⁺		1	0.923	0.325	0.138	0.168	0.162	-5.60E-03	0.295	-0.432	-7.50E-02
Mg ²⁺			1	0.577	0.334	0.446	9.00E-02	-9.30E-04	0.286	8.30E-02	-7.10E-03
Cl ⁻				1	0.622	0.891	7.00E-02	-0.205	-0.256	0.491	6.10E-02
SO ₄ ²⁻					1	0.77	-6.50E-04	-0.191	-9.80E-02	0.194	5.40E-02
HCO ₃ ⁻						1	2.00E-02	-0.17	1.30E-02	0.42	0.122
SiO ₂							1	-0.306	0.115	-2.40E-02	-1.90E-02
NO ₃ ⁻								1	0.924	-0.355	-9.50E-02
NO ₂ ⁻									1	-0.137	-8.30E-02
F ⁻										1	-5.70E-03
K ⁺											1

Anexo 2: Resultados de reconocimiento de campo en pozos perforados, 2011.

No	Ubicación	X	Y	pH	T (°C)	CE(uS/cm)	OD(mg/L)	Redox	STD	NEA	Elevación
1	Hacienda San Rafael	606002	1343159	7.4		1180	1.9	271.1	99.9	1.36	37
2	Hacienda San Rafael			7.9	27.4	403.6	3.3		425		
3	Hacienda El Consuelo	617889	1340853	7.4	28.9	2640	0.8	249.2	263		
4		621494	1339900	8.1	30.5	392	3.1	278		0.37	46
5		621506	1339775	7.6	28.8	1394	4.2	156.4	720		51
6	Paso Panaloya, La Tapia	622821	1341223	7.4	28.5	668	0.4	97.3	739		61
7	Graciela Morales	623116	1341402	7.5	29.4	1910	1	250		0.2	49
8	Thelma Mayorga	620993	1339434	7.1	29.5	2971	0.2	148.4	999	0.81	50
9		620188	1336668	8	29.4	2693	4.5	171.5	999	0.67	52
10	Los Mangos	603080	1348051		29.8	501	3.3	66.7	261	2.94	58
11	Pozo Los Mangos	603271	1348183								57
12	Carolina García	601973	1348988		29	570	4.3		299	6.62	65
13	El Pantanal	600205	1347977	7.3		609					68
14	Pabla Rodríguez	598280	1350131	7.3	31.8	639					65
15	Don Arturo Moreno	598727	1349388	7.3	33.4	511					
16	Finca El Amparo	618024	1338502	7.8		3430	3.7			0.23	47
17		618776	1338723	7.2	28.8	5670	0.8			0.4	42
18		608011	1341768	7.3	29.6	3300	197				48
19	La Bocana			7.3	29.2	770	1.8				
20	Doña Bertha			7.7	29.2	3080				1.14	
21	Francisco Valle	597238	1348839							1.39	69

No	Ubicación	X	Y	pH	T	CE	OD	Redox	STD	NEA	Elevación
1	Centro recreativo Tisma, Tizalnahualt	608438	1335739	8.7	37	793	0.5	306	353	surgente	60
2	Centro recreativo Tisma, Tizalnahualt	608425	1335756	8.1	31	390	0.7	434	218	surgente	60
3	Centro recreativo Tisma, Tizalnahualt	608516	1335875	8.1	31	432	1	493	217	surgente	58
4	Hacienda Hato Grande	605036	1343452		30	490	5.5		252		51
5	Hacienda San Juan	605142	1344276	8.7	35	453	1.1	138	255	surgente	51
6	Pozo Comunitario Plywood	603805	1347620	8.9	30	264	189		257	1.2	
7	Pozo La Carbonera	604787	1346338							1	48
8	Arrocera Avellano, Agua clorada	620144	1343253								
9	Arrocera, San Nicolás	616922	1343919	7.2	30	309	2.6	118	370	surgente	
10	Pozo Agua Potable, Visión Mundial	623138	1341410								44
11	Pozo Tisma	620142	1336265	8	29	324	7.2		263		
12	Hacienda El Quemado	603413	1347126	8.9	34	227	0.3		270	surgente	46
13	Jamaica				30	468	1.8	203	262		
14	Pozo San Juan, abastecimiento comunidad			35	577	3.8	100	273			
15	El Náutico	603466	1347744		32	462	1.3	-157			55
16	Pollo Estrella			7.5	41	745					
17		598020	1349887	8.3	32	550					
18	Shell Internacional	597886	1349705	7.2	33	608	3.6				
19	Hacienda El Quemado	603413	1347126	8.7	35	469					

Anexo 3: Resultados contenidos de isótopos estables de 36 muestras de agua en la zona de los interlagos.

No	X	Y	Nomenclatura	Ubicación	TIPO	SAMPLE ID	¹⁸ O _{water}	² H _{water}	T °C
1	617930	1332497	PP-Hatillo	Sistema de Agua Potable Lo ideal - El Hatillo	PP	Bthune-PP-EHLI	-6.5	-45.4	34.8
2	629357	1339456	MP-SE	MP - Malacatoya Santa Elisa	MP	Bthune-MP-SE	-3.2	-24.4	31.8
3	625660	1336776	MP-SP	MP- Hacienda San Pedro	MP	Bthune-MP-SP	-2.3	-15.8	33.4
4	608274	1341749	MP-CJAL 2	Cascajal 2	MP	Bthune-MP-CJAL 2	-3.9	-28.3	27.3
5	623213	1335523	AS-LC	Lago Cocibolca 1,2 Km oeste de desembocadura	AS	Bthune-AS-LC	-1.8	-13.2	29.1
6	620432	1339222	MP-PP	MP - Paso Panaloya	MP	Bthune-MP-PP	-3.8	-24.7	29.2
7	608004	1341535	MP-CJAL 1	Cascajal 1	MP	Bthune-MP-CJAL 1	-4.1	-27.3	27.8
8	611626	1339724	AS-LT	Laguna de Tisma	AS	Bthune-AS-LT	-2.0	-13.8	29.2
9	608195	1341673	AS-RTCJAL	Rio en el Cascajal	AS	Bthune-AS-RTCJAL	-2.0	-15.5	27.8
10	594058	1348807	AS-LX	Lago Xolotlán	AS	Bthune-AS-LX	-1.8	-13.0	26.8
11	603332	1347428	MP-EQ	MP - El Quemado	MP	Bthune-MP-EQ	-5.7	-39.1	28.7
12	603406	1346920	PP-EQ	PP- El Quemado	PP	Bthune-PP-EQ	-5.9	-40.4	34.5
13	603502	1347732	PP-CRN	Centro Recreativo El Náutico	PP	Bthune-PP-CRN	-6.2	-41.9	32.2
14	603999	1346220	AS-RT1	Muestra Río Tipitapa 1	AS	Bthune-AS-RT1	-2.1	-15.4	28.2
15	605032	1343260	PP-HG	PP - Hato Grande	PP	Bthune-PP-HG	-5.2	-37.2	29.6
16	606589	1342724	MP-DHG	MP - Después de Hato Grande	MP	Bthune-MP-DHG	-4.0	-30.2	29.3
17	607227	1343587	MP-EC	MP - Estero El Caballo	MP	Bthune-MP-EC	-3.6	-27.5	27.8
18	599931	1342924	PE-RG	PE - Rancho Grande	PS	Bthune-PE-RG	-6.2	-41.4	28.4
19	609545	1335806	PS-T	Pozo Surgente Tisma	PP	Bthune-PS-T	-6.1	-39.7	30.3
20	608422	1335530	PP-CRT1	Centro Recreativo Tisma 1	PP	Bthune-PP-CRT1	-6.3	-41.8	37.1
21	608410	1335565	PP-CRT2	Centro Recreativo Tisma 2	PP	Bthune-PP-CRT2	-6.0	-39.8	28.9
22	606096	1336193	PP-ET	Pozo Enacal Tisma	MP	Bthune-PP-ET	-5.9	-39.0	26.7
23	618166	1332832	MP-EH	MP - El Hatillo	MP	Bthune-MP-EH	-1.8	-13.1	28.6

No	X	Y	Nomenclatura	Ubicación	TIPO	SAMPLE ID	¹⁸ O _{water}	² H _{water}	T °C
24	619283	1334253	MP-YR	MP - Yadira Rocha	PP	Bthune-MP-YR	-0.7	-5.1	29.3
25	616302	1347356	PP-SN	PP - San Nicolás	PP	Bthune-PP-SN	-6.1	-41.1	29.9
26	607976	1349618	PP-TC195	PP - El Timal Cuadrante 195	**MAN	Bthune-PP-TC195	-5.9	-40.3	30.1
27	603695	1347519	M-JR	Manantial Justo Reyes	PP	Bthune-M-JR	-5.9	-40.2	28.7
28	603794	1347618	PP-PCP	PP – Pasckier	*PCP	Bthune-PP-PCP	-6.3	-43.1	32
29			PCP-1	Precipitación	*PCP	Bthune-PCP-1	-4.0	-26.7	28.5
30	604318	1346055	PCP -2	Precipitación -2	PP	Bthune-PCP-2	-2.4	-5.1	25.2
31	604730	1347755	PP-ET85	Pozo Perforado El Timal - Cuadrante 85	PP	Bthune-PP-ET85	-6.2	-43.4	32.3
32	605172	1344887	PP	Pozo perforado San Juan	PP	Bthune-PP-SJ	-5.4	-36.6	38.6
33	604794	1345188	PE -AS	Ana Sandoval	PE	Bthune-PE-AS	-6.2	-39.4	29.5
34	601963	1348789	PE-ROG	Rosa García	PE	Bthune-PE-ROG	-5.8	-40.0	28.7
35	598595	1350875	PP-ET	Pozo Perforado Enacal Tipitapa	PP	Bthune-PP-ETP	-6.2	-41.9	31.1
36	598837	1345416	PP-ELM	Pozo Perforado La Majada	PP	Bthune-PP-ELM	-5.4	-39.0	33.4

***PCP: Precipitaciones**

****MAN: Manantial**

PP: Pozo perforado

PE: Pozo excavado

AS: Aguas

Superficiales

MP: Mini piezómetros

Anexo 4: Resultados Analíticos de Plaguicidas Organofosforados

Matriz	Agua					Sedimentos		
Muestra	LD	PP - PASQUIER	PP - SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	RT- ESTERO EL CABALLO	LAGUNA DE TISMA	LD	Estero El Caballo	Laguna de Tisma
CO-RAL (COUMAFOS)	50	nd	nd	nd	nd	0.64	nd	nd
DIAZINON	15	nd	nd	nd	nd	5.31	nd	nd
DEF (TRIBUFOS)	25	nd	nd	nd	nd	0.55	nd	nd
ETIL - PARATION	15	nd	nd	nd	nd	0.16	nd	nd
ETION	20	nd	nd	nd	nd	0.2	22.05	5.51
FENTION	50	nd	nd	nd	nd	22.44	0.53	0.16
FORATE	50	nd	nd	nd	nd	4.57	1.95	0.37
GUTION (AZINFOS METIL)	100	nd	nd	nd	nd	2.73	nd	nd
MALATION	25	nd	nd	nd	nd	2.79	nd	nd
METIL -PARATION	15	nd	nd	nd	nd	0.65	nd	nd
MOCAP (PROFOS)	50	nd	nd	nd	nd	11.88	nd	nd
TERBUFOS	25	nd	nd	nd	nd	1.59	nd	nd
ZOLONE (FOSALONE)	15	nd	nd	nd	nd	0.07	nd	nd
NORTE		1347618	1332832	1343542	1339926		1343542	1339926
SUR		603794	618133	607240	610943		607240	610943
pH		8.91	8.42	7.48				
TEMPERATURA		33.8	34.4	28.8	27.4			
CE		450	568	1267				
HORA		09:10	08:55	11:20	10:00		11:20	10:00
FECHA		11/04/2012	09/04/2012	10/04/2012	10/04/2012		10/04/2012	10/04/2012

Anexo 5: Resultados Analíticos de Plaguicidas Organoclorados

Matriz	Agua ng/L					Sedimento		
Muestra	LD	PP - PASQUIER	PP - SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	RT-ESTERO EL CABALLO	LAGUNA DE TISMA	LD	Estero El Caballo	Laguna de Tisma
ALFA – HCH	0.23	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
BETA-HCH	0.67	nd	nd	nd	nd	0	nd	nd
DELTA-HCH	0.29	nd	nd	nd	nd	0	nd	nd
GAMMA - HCH (LINDANO)	0.36	nd	nd	1.34	nd	0	nd	nd
pp- DDE	0.19	0.43	nd	0.51	nd	0	22.05	5.51
pp- DDD	0.26	nd	nd	nd	nd	0	0.53	0.16
pp-DDT	0.82	nd	nd	nd	nd	0	1.95	0.37
HEPTACLORO	0.14	nd	nd	nd	nd	0	nd	nd
HEPTACLORO-EPOXIDO	0.11	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
ALDRIN	0.32	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
DIELDRIN	0.16	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
ENDRIN	0.28	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
ENDOSULFAN I	0.25	nd	nd	nd	nd	0.1	nd	nd
ENDOSULFAN II	0.11	nd	nd	nd	nd	0	nd	nd
NORTE		1347618	1332832	1343542	1339926		1343542	1339926
SUR		603794	618133	607240	610943		607240	610943
pH		8.91	8.42	7.48				
TEMPERATURA		33.8	34.4	28.8	27.4			
CE		450	568	1267				
HORA		09:10	08:55	11:20	10:00		11:20	10:00
FECHA		11/04/2012	09/04/2012	10/04/2012	10/04/2012		10/04/2012	10/04/2012

Anexo 6: Resultados Analíticos de Herbicidas

Matriz	Agua ng/L					Sedimentos ng/kg		
Muestra	LD	PP - PASQUIER	PP - SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	RT-ESTERO EL CABALLO	LAGUNA DE TISMA	LD	Estero El Caballo	Laguna de Tisma
AMETRINA	78.62	nd	nd	nd	nd	15.72	nd	nd
ATRATON	186.38	nd	nd	nd	nd	37.27	nd	nd
ATRAZINA	73.16	nd	nd	<ld	<ld	14.63	nd	nd
PROMETON	140.56	nd	nd	nd	nd	28.11	nd	nd
PROMETRINA	69.52	nd	nd	nd	nd	13.9	nd	nd
PROPAZINA	61.88	nd	nd	nd	nd	12.37	nd	nd
SECBUMETON	342.19	nd	nd	nd	nd	68.44	nd	nd
SIMAZINA	314.42	nd	nd	nd	nd	62.88	nd	nd
SIMETRINA	148.07	nd	nd	nd	nd	29.61	nd	nd
TERBUTILAZINA	76.3	nd	nd	nd	nd	15.26	nd	nd
TERBUTRINA	69.55	nd	nd	nd	nd	13.91	nd	nd
NORTE		1347618	1332832	1343542	1339926		1343542	1339926
SUR		603794	618133	607240	610943		607240	610943
pH		8.91	8.42	7.48				
TEMPERATURA		33.8	34.4	28.8	27.4			
CE		450	568	1267				
HORA		09:10	08:55	11:20	10:00		11:20	10:00
FECHA		11/04/2012	09/04/2012	10/04/2012	10/04/2012		10/04/2012	10/04/2012

Anexo 7: Resultados Físico Químicos en muestras de aguas subterráneas, manantiales y Aguas superficiales en la zona interlagos.

No	Muestra	Turbidez	pH	CE	STD	Color	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
	Unidad	NTU	Adim	µScm ⁻¹	mgL ⁻¹										
1	PM1 – LXA	21.8	7.82	634	448.64		32.54	9.14	101	11.7	45.34		16.7		331.97
2	PM1 – LXB	270	7.84	790	493.06		42.85	16.84	89.89	18.29	30.54	31.19	41.73		331.95
3	PM1- RTA	9.2	7.71	523	364.19		42.85	12.51	51.4	10.52	14.76	13.11	14.08		268.49
4	PM2-RTA	13.65	8	887	535.69		61.69	16.17	89.1	21.04	118		69.25		205.03
5	PM2-RTB	247	8.27	1247	714.13	15	27.78	12.51	189	29.72	157.5		88.7		322.19
6	PM3-RT	68	8.84	903	601.66	10	7.14	1.93	198	4.57	141.2	4.87	88.7	36	100.07
7	PP ENACAL CIUDADELA #1	0.6	8.02	484	320.8		48.21	13.2	30.4	8.56	2.72	12.76	4.86		270.93
8	AS LAGUNA DE TISMA	60	8.99	1345	770.98	15	27.21	13.2	230	34.52	143.36		76.63	57.6	349.03
9	PE - EL CASCAJA	1.4	8.2	1158	1062.85	5	20.99	18.4	339	30.54	160.8		60.75		737.12
10	AS - RT CASCAJAL	27.4	9	1296	739.96	10	23.33	14.4	219	32.73	135.8		78.84	55.2	336.83
11	MP - ESTERO EL CABALLO	28.1	8.52	10570	6615.49	25	27.21	46.67	2530	16.96	1430		627.9	480	2880.14
12	PE - MARVIN AVILÉZ	3.5	8.17	800	515.64	5	12.05	5.66	157	9.89	30.16	4.08	19.02		434.46
13	PP- HATO GRANDE	1.1	8.76	513	341.96		3.5	0.83	111	9.89	15.46	0.31	9.31	33.6	217.23
14	PP - EL NÁUTICO	0.8	8.94	498	316.01		2.33	0.47	108	8.18	11.2		8.39	33.6	212.35
15	PP- EL TIMAL CUADRANTE 85	0.6	8.78	654	405.42		5.64	0.35	126	7.23	65.28		74.42	19.2	119.6
16	MP - EL HATILLO	1	8.13	1037	565.64	5	39.28	22.15	131	4.22	102.28		52.05		354.9
17	PP - SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	0.7	8.64	627	391.63	10	7.07	3.1	116	7.2	47.72	0.75	25.97	12	224.55
18	MP - YADIRA ROCHA	37	7.96	3250	1740.76	5	282.8	137.17	147	4.72	676.8	0.31	77.84		696.85
19	PP - HACIENDA LA CHIRIPA	1	8.03	571	388.2		56.56	17.62	35.7	6.4	13.15	4.03	5.37		335.61
20	MP - MARGARITO CASTILLO	30.5	8.5	1196	741.77	15	33	13.34	131	127	46.92	1.68	107.92	24	424.7
21	MP - HACIENDA SAN PEDRO	31.6	8.29	3300	2184.54	25	80.12	42.87	657	7.1	108.64	0.31	718.8		1045.88
22	PUNTO CONTROL LAGO COCIBOLCA	34	8.92	274	144.23	5	11.39	7.38	30	6.1	22.37		11.89	9.6	79.33
23	MP - PASO PANALOYA	44.2	8.35	3030	1805.2	10	13.75	23.81	587	56.81	413.1	0.31	99.18	49.2	921.4
24	PE - TISMA	1.4	8.59	423	285.52		6.42	0.6	84.9	12.98	10.15		4.68	16.8	207.47
25	AS - LAGO XOLOTLÁN	26.3	8.94	1294	730.04	10	25.92	15.24	209	25.04	139.7		75.71	91.2	285.57

No	Muestra	Dureza total como CaCO ₃	Alcalinidad Total como CaCO ₃	Alcalinidad a la Fenolftaleína	Sílice Reactivo Disuelto	Nitritos	Hierro Total	Fluoruros	Amonio	Boro
	Unidad	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹
1	PM1 - LXA	118.8	272		68.34	0.007	0.16	0.68	0.006	0.63
2	PM1 - LXB	176.22	272		58.11	5.913	32.39	0.51	0.005	0.02
3	PM1- RTA	158.48	220		72.66	0.223	1.28	0.3	0.021	0.23
4	PM2-RTA	221.76	168		59.21	0.003	3.02	0.22	0.012	0.83
5	PM2-RTB	120.78	264		50.05	0.01	21.37	0.47	24.214	0.91
6	PM3-RT	25.74	142	29.99	68.92	0.187	6.79	1.13	1.647	4.71
7	PP ENACAL CIUDADELA #1	174.6	222.03		66.87				0.086	0.12
8	AS LAGUNA DE TISMA	122.22	382.25	48	16	0.01	2.67	0.71	0.199	1.44
9	PE - EL CASCAJA	128.04	604.07		67.64	0.01	0.02	2.29	0.074	0.88
10	AS - RT CASCAJAL	116.4	368.05	46	14.35	0.01	1.48	0.68	0.081	1.44
11	MP - ESTERO EL CABALLO	259.96	3160.15	399.95	37.65		3.15	3.01	0.285	11.47
12	PE - MARVIN AVILÉZ	53.35	356.04		63.04	0.02	0.47	1.12	0.107	0.53
13	PP- HATO GRANDE	12.13	234	28	50.2	0.01	0.05	0.56	0.082	0.36
14	PP - EL NÁUTICO	7.76	230	28	37.52			1.92	0.146	0.6
15	PP- EL TIMAL CUADRANTE 85	15.52	130	16	45.99			2.51	0.111	0.97
16	MP - EL HATILLO	189.14	299.05		34.63		0.03	0.6	0.075	
17	PP - SISTEMA DE AGUA POTABLE LO IDEAL	30.38	204	10	60.62		0.02	0.8	1.898	0.72
18	MP - YADIRA ROCHA	1270.08	571.05		71.49		2.84		0.91	
19	PP - HACIENDA LA CHIRIPA	213.64	275.05		84.34				0.104	0.13
20	MP - MARGARITO CASTILLO	137.2	388.05	20	48.08	0.03	0.68		0.158	
21	MP - HACIENDA SAN PEDRO	376.32	857.1		55.12		2.12	0.32	0.185	
22	PUNTO CONTROL LAGO COCIBOLCA	58.8	81	8	6.5		1.52		0.146	0.22
23	MP - PASO PANALOYA	132.3	837.1	41	107.51		3.31	1.47	0.052	
24	PE - TISMA	18.43	198	14	46.57	0.08		0.42	0.062	0.23
25	AS - LAGO XOLOTLÁN	127.4	386	75.99	15.25	0.01	0.8	0.7	0.136	1.41

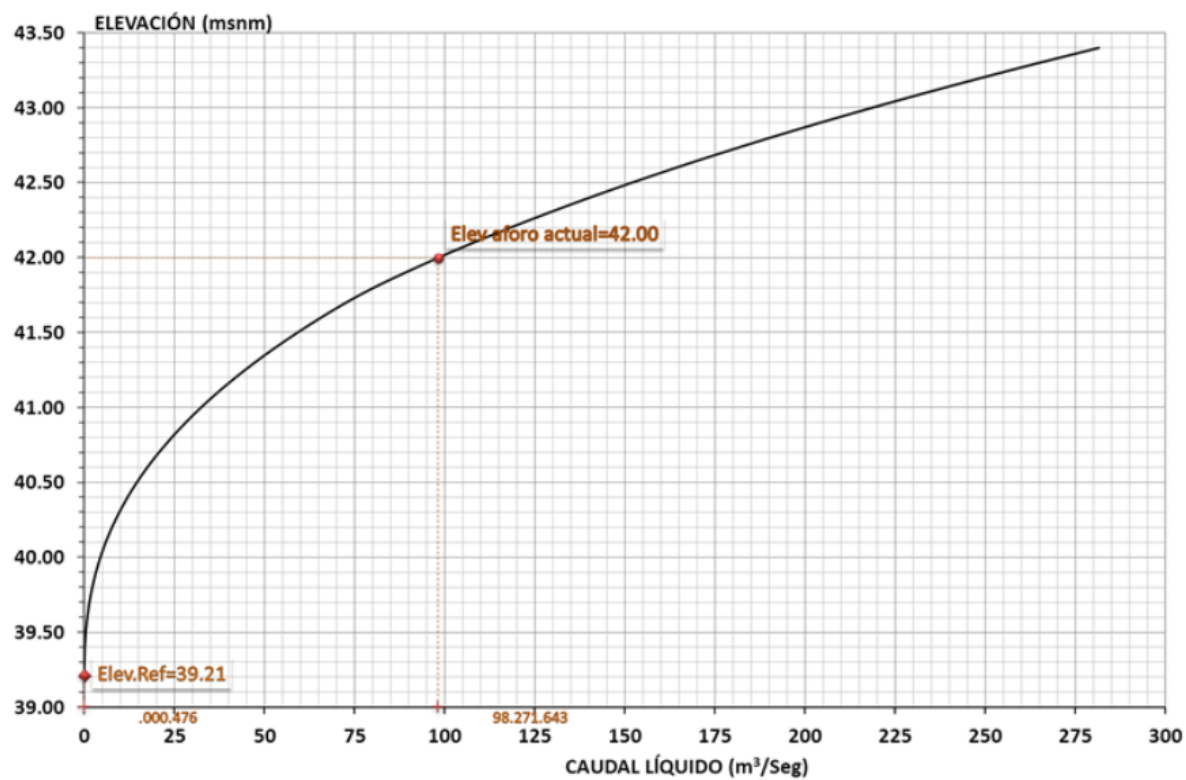
No	Muestra	Turbid ez	pH	CE	STD	Color	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
	Unidad	NTU	Adimensio nal	μScm ⁻¹	mgL ⁻¹		mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹
26	PE - ANA SANDOVAL	3.2	8.32	795	508.3	5	8.02	6.32	159	7.03	56.74	0.4	35.95	40.8	256.28
27	PE - ROSA HURTADO	2.1	7.95	794	336.97		68.14	7.29	30.6	5.38	15.74	19.67	7.35		275.81
28	Centro Recreativo Tisma 1	2.6	8.81	727	442.2		8.82	5.83	136	9.43	79.4		67.31	26.4	126.92
29	PP - Enacal Tisma 1	0.7	8.32	500	346.57		24.05	9.72	65.4	16.17	30.96	5.32	5.06	21.6	236.76
30	PE - Rancho Grande	1	7.99	860	548,,5 6		56.91	33.53	58.7	17.96	55.86	84.88	17.13		358
31	PP - Enacal Las Majadas	1.8	8.65	517	336.9		13.63	5.35	93.6	9.99	14.45	7.53	8.97	36	205.03
32	Termales Tipitapa	1	8.1	1669	1005.7 1		25.65	1.46	283	12.28	283.9		177.6		195.26
33	PP - Pasckier	0.7	8.96	509	326.69		4.81	2.92	107	7.88	17.45		14.6	24	214.79
34	PP - San Juan	1.6	8.96	573	382.01		4.81	2.43	120	9.84	17.98	0.31	20	38.4	229.44
35	EL TIMAL CUADRANTE 77	11.2	8.05	400	317.74		35.27	10.69	47.3	7.03	3.51		2.78		285.57

No	Muestra	Dureza total como CaCO ₃	Alcalinidad Total como CaCO ₃	Alcalinidad a la Fenolftaleína	Sílice Reactivo Disuelto	Nitritos	Hierro Total	Fluoruros	Amonio	Boro
	Unidad	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹
26	PE - ANA SANDOVAL	46	277.95	33.98	66.63		0.09	1.18	0.073	0.96
27	PE - ROSA HURTADO	200	226.05		46.87	0.013	0.15		0.071	0.12
28	Centro Recreativo Tisma 1	46	147.95	21.98	43.36	0.01		3.28	0.093	1.16
29	PP - Enacal Tisma 1	100	230	17.98	51.61	0.007		0.28	0.064	0.32
30	PE - Rancho Grande	280	294.05		47.16	0.095			0.039	0.23
31	PP - Enacal Las Majadas	56	227.95	29.98	46.61	0.003			0.115	0.41
32	Termales Tipitapa	70	160		124.23	0.003		1.59	3.815	8.78
33	PP - Pasckier	24	215.95		41.05			1.41	0.144	0.61
34	PP - San Juan	22	251.95	31.98	54.54	0.003	0.26	0.93	0.079	0.75
35	EL TIMAL CUADRANTE 77	132	234		70.5		0.52	0.26	0.07	

Anexo 8: Resultados de metales y metaloides en zona de los interlagos.

No	Muestra	Aluminio	Arsénico Total	Cadmio total	Cinc total
	Unidad	μgL^{-1}	μgL^{-1}	μgL^{-1}	μgL^{-1}
1	PM - 1 LXB	2000	14.49	<ld	35.95
2	PM1 - LXA	250	5.56	<ld	<ld
3	PM1 - RTA	459	6.3	<ld	<ld
4	PM2 - RTA	1094	4.18	<ld	<ld
5	PM2 - RTB	8096	4.18	<ld	46.6
6	PM3 - RT	3514	2.67	<ld	<ld
7	MP - Margarito Castillo	301	19.7	<ld	1067.6
8	MP-Hcda San Pedro	308	9.81	<ld	<ld
9	PC - Lago Cocibolca	593	2.22	<ld	<ld
10	PP - Pasckier	30	22.99	<ld	<ld
11	PP - Enacal Las Majadas	<ld	11.23	<ld	<ld
12	MP - El Hatillo	45	7.57	<ld	76.7
13	PP Sistema de Agua Potable Lo Ideal	84	4.34	<ld	67.9
14	MP- Yadira Rocha	490	<ld	<ld	1003.6
15	PP - Hcda La Chiripa	71	6.87	<ld	<ld
16	As Laguna de Tisma	549	21.06	Nd	Nd
17	As Lago Xolotlán	307	18.89	Nd	Nd
18	As - RT Cascajal	329	22.39	Nd	Nd
19	PP- El Timal Cuadrante 85	Nd	29.38	Nd	Nd
20	Pozo Enacal Ciudadela No 1	Nd	7.07	Nd	Nd
21	PP - Hato Grande	31	15.87	Nd	Nd
22	PE - Marvin Avilés	290	17.78	Nd	Nd

Anexo 9: Curva de Gasto, elaborada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.



Anexo 10 Memoria fotográfica de construcción e instalación de piezómetros



Foto 1: Perforación de piezómetros en la naciente del Río Tipitapa en el lago Xolotlán.



Foto 2: Perforación de piezómetro en la costa del lago Xolotlán, nótese en el fondo el espejo de agua.



Foto 3: Equipo de perforación empleado para la instalación de los cuatro piezómetros.



Foto 4: Panorámica de equipo y accesorios de perforación.



Foto 5: Material extraído de la perforación del piezometro PMLX, ubicado en la costa del lago Xolotlán.



Foto 6: Perforación del piezómetro PM2-RTA y B.